

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

**Optimalizace procesu tepelného  
zpracování výrobků z křemíkové  
orientované oceli**

Optimization of the Heat Treatment  
Process of Silicon-Oriented Steel Products

Student:

Bc. Lukáš Šafařík

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

OSTRAVA 2019

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Šafařík**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Téma: Optimalizace procesu tepelného zpracování výrobků z křemíkové orientované oceli  
Optimization of the Heat Treatment Process of Silicon-Oriented Steel Products

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Materiálová analýza konstrukce žíhací mufle.
2. Procesní analýza elektromagnetických vlastností transformátorových jader.
3. Návrh procesních opatření tepelného zpracování transformátorových jader.
4. Návrh konstrukčních změn ke zvýšení životnosti žíhací mufle.
5. Technicko ekonomické vyhodnocení souboru návrhu.

### Seznam doporučené odborné literatury:

CALLISTER, W.D., Jr. *Material Science and Inginerig an Introduction*, John Wiley & Son, 2003  
JECH, J. *Tepelné zpracování oceli: Metalografická příručka*. 4. vyd. Praha 1: SNTL, 1983  
PLUHAŘ, J. *Nauka o materiálech*, SNTL, Praha 1989, 552 s.  
PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci, včetně příloh, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní podklady poskytnuté společností ArcelorMittal Technotron, s. r. o., Frýdek-Místek, společnost s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 10. května 2019



.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 10. května 2019.



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Lukáš Šafařík

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Kunčičky u Bašky 145, 739 01 Baška

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŠAFAŘÍK, L. *Optimalizace procesu tepelného zpracování výrobků z křemíkové orientované ocele*. Ostrava: VŠB– Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2018, 73 s. Vedoucí práce: Hrubý, J.

Diplomová práce se zabývá problematikou tepelného zpracování anizotropní transformátorové oceli s ohledem na zvýšení životnosti žíhací mufle bez negativního dopadu na požadované elektromagnetické vlastnosti jader magnetických obvodů. V úvodu je detailně rozebrána stávající žíhací mufle z hlediska konstrukčního provedení a použitého základního materiálu. V další části je podrobena detailnější analýze tepelně zpracovávaná křemíková ocel, přesněji řečeno výrobky z ní, jednak z hlediska procesního, tak materiálového. Cílem diplomové práce je nalézt optimální tvar křivky tepelného zpracování výrobků z křemíkové ocele s ohledem na dodržení jejich elektromagnetických vlastností při konstrukčních příp. materiálových změnách žíhací mufle vedoucí nejen ke zvýšení životnosti samotné mufle, ale také k urychlení procesu tepelného zpracování výrobků z křemíkové oceli.

Klíčová slova: orientovaná křemíková ocel, tepelné zpracování, žíhací mufle, austenitická žáruvzdorná ocel.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

ŠAFAŘÍK, L. *Optimization of the Heat Treatment Process of Silicon-Oriented Steel Products*. Ostrava: VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of mechanical technology, 2018, 73 p. Thesis head: Hrubý, J.

Master thesis is dealing with issue of heat treatment of anisotropic transformer steel with regard to increasing the service life of annealing muffle without negative impact on required electromagnetic properties of cores of magnetic circuit. In the introduction is discussed in detail the existing annealing muffle in terms of design and used base material. In the next part, the thermally processed silicon steel is subjected to a more detailed analysis, more precisely the products from it, both from the process and material point of view. The purpose of this thesis is to find the optimum shape of the heat treatment curve of silicon steel products with respect to their electromagnetic properties in structural or structural applications. Material changes of annealing muffle leading not only to increase the life of the muffle itself, but also to accelerate the heat treatment process of silicon steel products.

Keywords: oriented silicon steel, heat treatment, annealing muffles, refractory austenitic stainless steel.

## OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A ZKRATEK .....	8
ÚVOD.....	10
1 MATERIÁLOVÁ ANALÝZA KONSTRUKCE ŽÍHACÍ PECE.....	11
1.1 Stručný popis zařízení – šachtová plynová pec .....	11
1.2 Četnost kontrol aktuálního stavu pecí.....	12
1.3 Konstrukční provedení žíhací mufle (retorty) .....	14
1.4 Analýza základního materiálu žíhací mufle.....	14
1.4.1 Definice žáruvzdorných ocelí.....	14
1.4.2 Mikrostruktura austenitických žáruvzdorných ocelí .....	16
1.4.3 Mechanické a fyzikální vlastnosti žáruvzdorných ocelí.....	16
1.4.4 Vliv chemického složení na vlastnosti žáruvzdorných ocelí.....	17
1.4.5 Vliv prostředí žíhací pece na vlastnosti žáruvzdorných ocelí .....	18
1.4.6 Svařování austenitických žáruvzdorných ocelí .....	18
1.4.7 Austenitická žáruvzdorná ocel X8CrNi25-21 (1.4845).....	19
1.4.8 Zhodnocení žíhací mufle z hlediska konstrukčního a materiálového ....	21
2 PROCESNÍ ROZBOR TRANSFORMÁTOROVÝCH JADER .....	23
2.1 Obecně o magnetických materiálech .....	23
2.2 Feromagnetické materiály.....	24
2.3 Magneticky měkké materiály.....	26
2.4 Křemíková orientovaná ocel.....	28
2.4.1 Konvenční křemíková orientovaná ocel (CGO).....	28
2.4.2 Křemíková orientovaná ocel s vysokou permeabilitou (HGO).....	29
2.5 Chemické složení a typické mechanické a fyzikální vlastnosti CRGO.....	30
2.6 Elektromagnetické vlastnosti jader .....	30
2.7 Zjednodušený postup výroby jader magnetických obvodů v AMT .....	31
2.8 Tepelné zpracování jader magnetických obvodů.....	32
2.8.1 Křivka tepelného zpracování výrobků z GOES v AMT .....	33
2.8.2 Ochranná atmosféra N <sub>2</sub> .....	35
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	36
3.1 Návrhy teplotních křivek .....	36
3.1.1 Žíhací křivka - standard .....	37
3.1.2 Návrh žíhací křivky č.1 .....	41
3.1.3 Návrh žíhací křivky č.2 .....	45
3.1.4 Srovnání z hlediska naměřených hodnot u provedených testů.....	48
3.1.5 Srovnání z hlediska vypočtených hodnot u provedených testů.....	49
3.2 Návrhy úprav konstrukce pece a parametrů mufle .....	49
3.2.1 Úpravy konstrukce pece .....	49

3.2.2	Úpravy žíhací mufle .....	51
4	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	53
4.1	Ekonomické přínosy optimalizací teplotní křivky.....	53
4.1.1	Srovnání z hlediska úspor ve spotřebě provozních médií .....	53
4.1.2	Srovnání z hlediska navýšení kapacit.....	54
4.2	Ekonomické přínosy úpravou konstrukce pece a žíhací mufle.....	55
5	ZÁVĚR .....	57
	LITERATURA .....	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	63
	SEZNAM TABULEK .....	64
	SEZNAM PŘÍLOH .....	64
	PŘÍLOHY .....	65

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A ZKRATEK

Zkratka	Popis
AMT	ArcelorMittal Technotron, s. r. o.
FCC (KPC)	face centered cubic (mřížka kubická plošně centrovaná)
BCC (KSC)	body centered cubic (mřížka kubická prostorově centrovaná)
TOO	tepelně ovlivněná oblast
TIG	Tungsten Inert Gas (svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu)
HB	Brinell hardness, tvrdost podle Brinella
$\alpha$	feritická fáze
$\sigma$	intermetalická fáze
$\gamma$	austenitická fáze
UNICORE	typ formovaných jader magnetických obvodů
YIG	yttrium iron garnet, druh syntetického granátu
CGO, CRGO	cold rolled grain oriented steel, za studena válcována orientovaná ocel
GOES	grain oriented electrical steel, orientovaná transformátorová ocel
HGO	high permeability grain oriented electrical steel, orientovaná transformátorová ocel s vyšší hodnotou permeability
EI, I	typ skládaných jader z přístřihů tvaru E,I

Značka	Popis	Jednotka
A	tažnost	[%]
$\mu_a$	magnetický moment atomu	[-]
M	magnetizace	[A.m <sup>-1</sup> ]
$\chi$	magnetická susceptibilita	[-]
T <sub>c</sub>	Curieova teplota	[°C]
H <sub>c</sub>	koercitivní intenzita magnetického pole	[A.m <sup>-1</sup> ]
B	magnetická indukce	[T]
f	frekvence (kmitočet)	[Hz]
M <sub>s</sub>	spontánní zbytková magnetizace	[A.m <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	magnetostrikce	[-]



$H_{\text{eff}}$	efektivní hodnota intenzity magnetického pole	[A.m <sup>-1</sup> ]
$H_{\text{max}}$	maximální hodnota intenzity magnetického pole	[A.m <sup>-1</sup> ]
$B_{\text{max}}$	maximální hodnota magnetické indukce	[T]
$S$	zdánlivý výkon	[VA]
$P_{\text{fe}}$	měrné ztráty	[W]
$\bar{t}$	průměrná teplota výrobku	[°C]
$t_{\text{pec}}$	teplota pece	[°C]
$t_0$	počáteční teplota výrobku	[°C]
$t_k$	konečná teplota výrobku	[°C]
$B_i$	Biotovo kritérium	[-]
$q$	průměrný tepelný tok	[W.m <sup>-2</sup> ]
$\bar{\alpha}_{\Sigma}$	součinitel přestupu tepla	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$b$	tloušťka výrobku	[m]
$\lambda_m$	tepelná vodivost	[W.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ]
$Z$	teplotní krok	[°C]
$\tau$	čas ohřevu	[hod]
$t_{\text{pec},0}$	počáteční teplota pece	[°C]
$T_{\text{sp}}$	průměrná teplota spalin	[°C]
$\alpha_{s+k}$	průměrný součinitel přestupu tepla	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$m$	součinitel zohledňující fyzikální vlastnosti výrobku	[-]
$m_h$	hmotnost výrobku	[kg]
$k$	součinitel tvaru tělesa	[-]
$\rho$	měrná hmotnost	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$c$	měrná tepelná vodivost	[kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$S_m$	plocha výrobku vystavena ohřevu	[m <sup>2</sup> ]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[-]
$D$	vnější průměr výrobku	[m]
$d$	vnitřní průměr výrobku	[m]
$h$	výška výrobku	[m]
$e$	Eulerovo číslo	[-]
$\dot{U}_{\text{ZP+EL,rok}}$	roční úspora ve spotřebě zemního plynu a elektřiny	[Kč]
$\dot{U}_{\text{ZP+EL,výrobek}}$	úspora ve spotřebě zemního plynu a elektřiny vztažená na výrobek	[Kč/kg]
$C_{\text{rok}}$	roční kapacitní úspory	[kg]

## ÚVOD

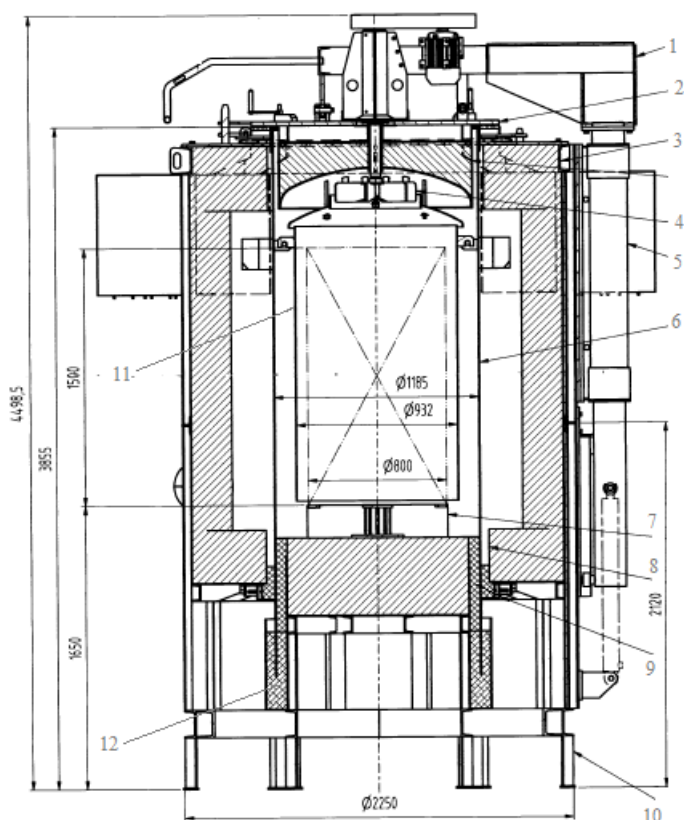
Magneticky měkké materiály s obsahem křemíku okolo 3% objevené v první polovině minulého století přinesly velkou inovaci ve výrobě síťových transformátorů. Došlo k výraznému zmenšení rozměrů, hmotnosti a snížení ztrát transformátoru. I když se vývoj nových materiálů pro stavbu transformátorů nezastavil, stále má křemíková orientovaná ocel své nezastupitelné místo v oblasti elektrotechnických aplikací.

Na výrobu vinutých jader magnetických obvodů z uváděné oceli se zaměřují v České republice pouze dva přední výrobci. Jedním z nich je společnost ArcelorMittal Technotron, s. r. o. sídlící ve Frýdku-Místku, která dodává jádra, „srdce transformátoru“, do celého světa. Ve jmenované společnosti budou aplikovány veškeré testy a analýzy uvedené v diplomové práci. Výrobky musí splňovat zákazníkem požadované elektromagnetické vlastnosti, převážně nízkou hodnotu měrných ztrát. Operace tepelného zpracování je při výrobě vinutých jader nejdůležitější z hlediska odstranění vnitřního pnutí a deformací vnesenými do materiálu výrobků předchozími tvářecími operacemi. Bez žíhání by jádra nesplňovala požadované elektromagnetické vlastnosti. Hlavním cílem řešené práce bude nalézt optimální křivku procesu žíhání vedoucí ke snížení nákladů při splnění předepsaných kritérií. Dalším cílem bude zhodnotit stav a efektivitu provozu šachtových plynových pecí.

# 1 MATERIÁLOVÁ ANALÝZA KONSTRUKCE ŽÍHACÍ PECE

## 1.1 Stručný popis zařízení – šachtová plynová pec

Ve společnosti ArcelorMittal Technotron, s. r. o. (dále AMT) se nachází dvě plynové šachtové žíhací pece s řízenou ochrannou atmosférou  $N_2$ . Pece, pod obchodním označením PK 10.15/8,5, byly navrženy a zhotoveny společností Realistic s. r. o. k tepelnému zpracování – žíhání magnetických vinutých obvodů z orientované křemíkové oceli pro teploty max.  $840^{\circ}C$ , v roce 2007 (viz Obr. 1 – řez pece).



*Obrázek 1 - Řez šachtovou plynovou pecí*

- 1 - nosné otočné rameno víka
- 2 - víko pece
- 3 - izolační materiál víka
- 4 - ventilátor
- 5 - otočný sloup
- 6 - žíhací mufle (retorta)
- 7 - podstavec pod vsázku
- 8 - izolační vyzdívka pece
- 9 - vláknitá izolace
- 10 - nosný prvek pece
- 11 - oběhová vložka
- 12 - křemičitý písek

Kostra pece je sešroubovaná ze dvou dílů, je svařená z ocelových profilů a je zakryta ocelovým pláštěm. Tepelná izolace pece je provedena z vláknitých materiálů a z lehčených izolačních cihel. Pracovní prostor je od topného prostoru oddělen retortou (muflí) z žáruvzdorné oceli. Retorta je roura shora uzavřená víkem a zespodu vyzdívkou dna a je utěsněna v peci pískovým zásypem (křemičitý písek) a vláknitou izolací dole a těsnicí šňůrou nahoře. Retorta a víko jsou vzájemně těsněny silikonovou pryží, která je uložena v drážce chlazené vodou. Víko pece má vláknitou izolaci a je také chlazeno vodou z otevřeného chladicího okruhu pece.

Na víku je umístěn ventilátor, tlaková bezpečnostní klapka, termočlánekový snímač teploty a přívody pracovních medií (inertní plyn  $N_2$ ). Ventilátor promíchává pracovní atmosféru a přispívá k rovnoměrnému rozložení teploty v peci. Oběhová vložka vyrobená z žáruvzdorné oceli vložená do retorty umožňuje lépe rozvádět atmosféru v pracovním prostoru, kde je udržován mírný přetlak pracovní atmosféry. Víko je zvedáno hydraulickým válcem, otočení do strany se provádí ručně. Za provozu pece je víko dotlačeno k přírubě retorty utažením čtyř kliček rozmístěných po obvodu příruby retorty. Vsázka je do pece založena na přípravcích opět zhotovených ze žáruvzdorných materiálů, které se do pece uloží na podstavec vsázky.

Ohřev každé pece zajišťují 3 plynové předsměšovací hořáky Elster Kromschröder, typ BIC 80 HB – 0/35-/16/F na zemní plyn o jmenovitém výkonu hořáku 105kW s příslušnými regulačními a uzavíracími ventily a hořákovými automaty. Hořáky se nachází ve výšce 1200mm od spodní hrany retorty rovnoměrně po obvodu vyzdívky pece. Teplota pece je snímána termočlánekovým snímačem teploty. Pro kontrolu průběhu tepelného zpracování slouží bezpapírový zapisovač BrainChild VR-06 (viz Obr. 2). Spaliny jsou odvedeny odtahovým potrubím do komína odtahu spalin.



*Obrázek 2 – Zapisovač BrainChild VR-06*

Každá pec je vybavena systémem umožňujícím řízení chladnutí vsázky v peci. Ventilátor vhání studený vzduch do pece potrubím připojeným ke dvěma vstupním otvorům ve spodní části pece a ochlazuje retortu. Ohřátý vzduch odchází odtahovým potrubím připojeným ke dvěma odtahovým otvorům v horní části pece, které jsou opatřeny dvěma elektromotoricky ovládanými klapkami, které po otevření umožní odvod horkého vzduchu z pece do odtahového potrubí. Obě pece jsou částečně zapuštěné pod podlahu výrobní haly AMT na operaci vakuového lepení.

## **1.2 Četnost kontrol aktuálního stavu pecí**

Na obou šachtových pecích probíhá pravidelná kontrola a údržba v intervalech na denní bázi (obsluha):

- kontrola a stav pískového zásypu,
- vizuální kontrola těsnosti vík pece,
- vizuální kontrola dostatečného průtoku chladicí okruhu,
- kontrola správnosti provozních stavů (tlaky plynů, teplota, tlak vzduchu),
- kontrola činnosti regulace a monitorování stavů,
- kontrola pojistných ventilů,
- kontrola větrání a přívodu vzduchu pro spalování,
- kontrola teplotní křivky (detailní rozbor v PC),

na měsíční bázi (údržba):

- kontrola stavu vyzdívky,
- kontrola stavu retorty (žíhací mufle) a oběhové vložky,
- kontrola netěsnosti rozvodů atmosfér,
- kontrola netěsnosti rozvodu zemního plynu,
- nulování manometrů,

na půlroční bázi (externisté):

- kontrola a kalibrace termočlánků,
- kontrola plynových hořáků,

na roční bázi (revizní technici):

- revize plynových zařízení,
- revize komínů,
- revize elektrických zařízení,

Pravidelné kontroly a revize zabraňují častějším výskytům poruch a dlouhodobých odstávek způsobených nedostatečnou kontrolou aktuálního stavu zařízení.

Vyskytující se nedostatky během pravidelného užívání zařízení od roku 2007, které měly výrazný vliv na plynulý chod zařízení:

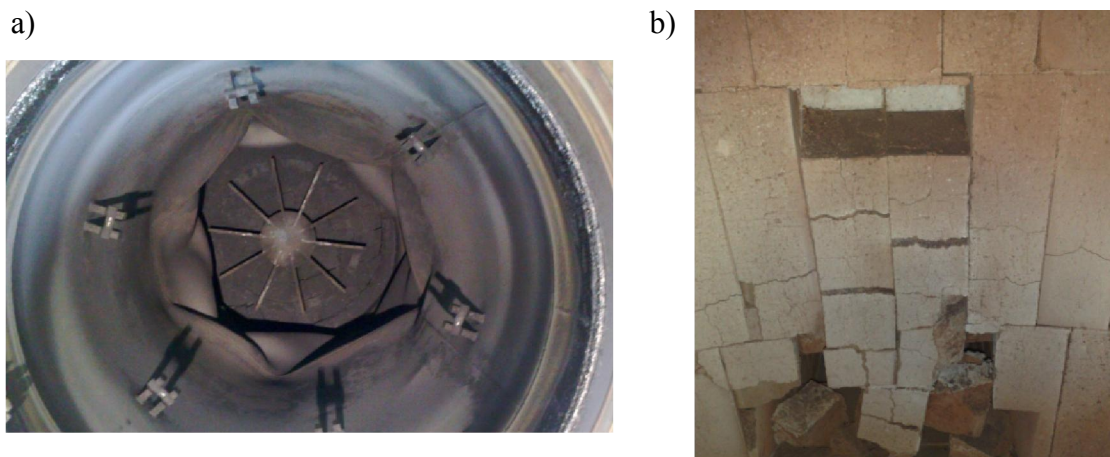
2x výměna utržené hřídele ventilátoru (na 1 peci),

2x výměna víka na obou pecích (netěsnosti chladicího okruhu),

1x ročně výměna žíhacích muflů (retort) na obou pecích – ukázka deformace viz Obr. 3a,

1x ročně oprava poškozených cihel vyzdívky – ukázka poškození viz Obr. 3b,

Stav pecí odpovídá počtu provozovaných hodin, pece pracují v čtyřdenním cyklu (jeden žíhací cyklus trvá cca 18hodin).



*Obrázek 3 – Ukázka poškození částí pece: a) deformace mufle, b) sesypání vyzdívky*

Uvedené nedostatky měly vždy negativní dopad na celkovou životnost retorty - vliv úniku chladicí kapaliny z víka do pracovního prostoru pece (zvýšená oxidace pracovního prostoru pece) a poškození vyzdívky (únik zplodin a ohřátého vzduchu mimo prostor pece, prodloužení žíhacího cyklu, větší zátěž plynových hořáků).

### **1.3 Konstrukční provedení žíhací mufle (retorty)**

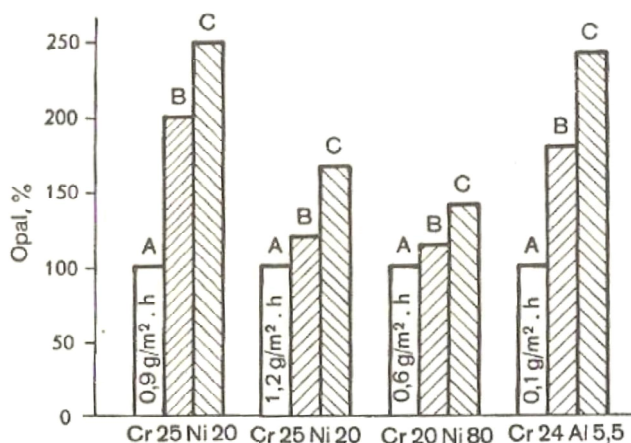
Žíhací mufle je vyrobena z austenitické žáruvzdorné oceli jakosti X8CrNi25-21 (1.4845) dle ČSN EN 10095 o tloušťce 6mm. Základními rozměry mufle jsou její vnější průměr 1180mm a výška 3125mm. Kruhovitý tvar žíhací mufle je zhotoven postupným zakružováním a svařením (podrobněji o svařování viz bod 1.4.6) šesti ks tabulí o rozměru 6x1250x2000mm, na který je po obvodě ve stanovené výšce pevně přivařeno šest záchytných háků pro usazení oběhové vložky. K vrchní části takto vyrobeného válce je přivařen límec s oky pro pevné usazení k vnější konstrukci žíhací pece.

### **1.4 Analýza základního materiálu žíhací mufle**

#### **1.4.1 Definice žáruvzdorných ocelí**

Akademik Jareš žáruvzdorné oceli definuje odlišností od korozivzdorných ocelí hlavně přísadou kovů, které tvoří za žáru pevně k povrchu lpící oxidový povlak větší tloušťky, zabráňující další oxidaci (1960, s. 139). Žáruvzdorné oceli se oproti uhlíkovým ocelím chovají z hlediska tvorby oxidové povlaku jinak, chrom v žáru oxiduje snadněji než železo a vytváří tak ochranný povlak s vyšším obsahem chromu. Povlak chrání oceli proti zhoubné oxidaci pouze za předpokladu vzniku dostatečného množství oxidu chromitého.

Obsah chromu zaručuje dobrou žáruvzdornost a stoupá s teplotou plynule. Neexistuje zde hranice obsahu chromu jako pro pasivitu antikoročních ocelí. Každá žáruvzdorná ocel má stanovenou maximální pracovní teplotu a při překročení těchto teplot dochází k výraznému opalu, který zabraňuje jejímu dalšímu použití. Při poškození nebo odstranění oxidové vrstvy se vytvoří vrstva nová, ovšem ta vzniká vždy na úkor oceli, proto jakékoliv soustavné porušování a odstraňování povlaků způsobuje větší ztrátu oceli opalováním. Ochranný povlak má jinou tepelnou roztažnost než ocel, je křehký, nemůže se plasticky deformovat a při větších změnách teploty se trhá a odlupuje. Součásti vyrobené ze žáruvzdorných ocelí, které se při používání často ohřívají a ochlazují, podléhají opalu více než předměty, které pracují při konstantních teplotách (viz Obr. 4 – Porovnání opalu dle teplotního zatížení). [1], [6]



**Obrázek 4 – Opal žáruvzdorných ocelí a Ni-Cr ocelí při teplotě 1200°C při různém teplotním zatížení<sup>1</sup>**

A-žiháno nepřetržitě 120h, opal g/m<sup>2</sup> je vepsán ve sloupcích a vzat za základ 100%;  
B-žiháno celkem 120h s ochlazením po každých 24h;  
C-žiháno celkem 120h s ochlazením po každých 12h

Ptáček a kolektiv zařazuje žáruvzdorné oceli mezi slitiny na bázi Ni-Cr nebo Ni-Cr-Fe, kde nikl s chromem tvoří soustavu s úplnou rozpustností v tuhém stavu (2002, s. 224). Celkový obsah legujících prvků je v porovnání s korozi-vzdornými oceli-mi zpravidla větší. Volba legujících prvků je závislá na výšce provozní teploty součásti, s vzrůstající teplotou se úroveň legování zvyšuje. Chromniklové austenitické oceli jsou z hlediska chemického složení odvozeny od ocelí typu 18/9, kde obsah Ni může být od 10 až 40% a Cr od 20 až 27%. Ve srovnání s chromovými žáruvzdornými oceli-mi mají lepší plastické vlastnosti a také lépe odolávají změnám teploty. Nevýhodou je, že špatně snášejí prostředí obsahující sloučeniny síry. [7]

#### 1.4.2 Mikrostruktura austenitických žáruvzdorných ocelí

Austenitické oceli jsou polykrystalické, skládající se z austenitických zrn, které obsahují substituční a intersticiální nečistoty. Atomová struktura FCC (KPC) austenitických ocelí poskytuje více krystalových rovin pro tok dislokací, které dávají materiálu dobrou tažnost. Cokoliv, co může poskytnout překážky pro dislokační pohyb v kovu a tím snížit průběh plastické deformace, posílí materiál. Austenitické oceli nejsou vytvrditelné tepelným zpracováním na základě transformace, neboť při ohřevu a ochlazování nedochází k fázovým přeměnám. Krystalografická mřížka austenitu FCC má vzhledem ke svému těsnějšímu uspořádání atomů větší prostor pro tvorbu intersticiálních míst oproti struktuře BCC ve feritu. Např. rozpustnost uhlíku v austenitu je 40x vyšší než u feritu při 723°C nebo rozpustnost dusíku je více než 20x vyšší než u feritu při 590°C. Tyto rozdíly v rozpustnosti jsou plně využity při tepelném zpracování oceli a mají výrazný vliv na zvýšení pevnosti. [4]

#### 1.4.3 Mechanické a fyzikální vlastnosti žáruvzdorných ocelí

*Mez kluzu* u austenitických ocelí dosahuje jen 40% *meze pevnosti*. Je to dáno tím, že při tváření oceli za studena jsou značně zpevněny. Dále jsou velmi *tvárné, houževnaté*, mají *velkou tažnost* a *vrubovou houževnatost*, tyto vlastnosti se nezhoršují ani při velmi nízkých teplotách. Mez pevnosti, kluzu a tvrdost vzrůstá s obsahem uhlíku a některých dalších prvků. Při vyšších teplotách je rozhodující mez tečení a pevnost při tečení. Tečení a jeho rychlost jsou výslednicí dvou protichůdných dějů: zpevňování plastickou deformací a odbourávání zpevnění. Zpevněním se poruchy mřížky a nepravidelnosti zvětšují a vzniká vnitřní pnutí. Zvýšením teploty se zvětší pohyblivost atomů, které se pak mohou snáze přeskupovat, tím dochází k odbourání zpevnění a uvolnění pnutí. Rychlost tečení při stejném napětí vzrůstá se stoupající teplotou. Na *mez tečení* má značný vliv také tvorba okujů a nitridů vzniklé působením kyslíku a dusíku ze vzduchu. Kovy s velmi vysokou rekrytalizační teplotou (Cr, W, V, Mo) zvyšují ve slitinové oceli mez tečení. [1], [3]

Žáruvzdorné slitiny mají vysoké *koeficienty tepelné roztažnosti* a nízkou *tepelnou vodivost* - obě vlastnosti mají tendenci vytvářet teplotní a tlakové rozdíly mezi různými částmi materiálu. Koeficient tepelné roztažnosti je dán vzájemným působením mezi vazebnou energií a délkou vazby. Energie vazby vzrůstá se snižující se meziatomovou vzdáleností, jelikož u FCC struktury je uspořádání těsnější, je koeficient tepelné vodivosti vyšší (až o 40%) oproti feritickým nebo martenzitickým korozivzdorným ocelím, zatímco



tepelná vodivost je naopak nižší (až o 30%) z důvodu menšího pohybu volných elektronů. [3]

#### 1.4.4 Vliv chemického složení na vlastnosti žáruvzdorných ocelí

*Chrom* zlepšuje žáruvzdornost, již při 25% Cr lze oceli úspěšně použít pro teploty okolo 1100°C. Složení ocelí s vysokým obsahem chromu se musí uzpůsobit tak, aby při pracovní teplotě 500-700°C nevznikala intermetalická fáze  $\sigma$ , která je velmi křehká a proto zmenšuje houževnatost oceli. Žáruvzdornost lze zlepšit také přidáním *křemíku a hliníku*. *Křemík* do obsahu 0,5% není považován za legující prvek, ale dezoxidační přísadu. Oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ), který v okujích tvoří křemičitany, podporuje ochranný účinek povlaku. Při množství 3-4% Si odstraňuje také náchylnost k mezikrystalové korozi. Pro zlepšení mechanických vlastností za studena i žáru se přidává také *nikl* nebo *mangan*. *Nikl* dále zlepšuje při vysokých koncentracích také celkovou žáruvzdornost oceli a hlavně podporuje vznik austenitické struktury, kterou se dosahuje lepších mechanických vlastností než u feritické struktury. *Mangan* může nahrazovat v austenitických ocelí dražší Ni. Zvyšuje stabilitu austenitu a pevnostní charakteristiky oceli, ale zhoršuje obrobitelnost. Pro zlepšení mechanických vlastností (mez tečení a mez pevnosti při tečení) při vysokých teplotách se přidává také *molybden, vanad, wolfram, niob* nebo *titan*. Při obsahu 0,5-3% těchto kovů nemají vliv na žáruvzdornost oceli do 900°C. Nad 1000°C zhoršují Mo, W a V ochrannou schopnost okují. [1], [4]

*Titan a niob* mohou být do oceli přidány z důvodu tvorby karbidů a potlačují náchylnost k mezikrystalové korozi. Příklad molybdenu větší než 5% škodí i při nižších teplotách, což se vysvětluje vznikem těkavého oxidu molybdenového ( $\text{MoO}_3$ ). V žáru se Cr, Al, Si, Mn, W a V oxidují snadněji než Fe. Cr tvoří vrstvu oxidu chromitého ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), která zvyšuje odolnost povrchové ochranné vrstvy, která se může rychle přetvářet, pokud je povrch poškozen. Prvky Ni, Co, Mo a Cu oxidují méně snadněji než Fe. *Uhlík* zvyšuje pevnostní vlastnosti a stabilizuje austenit po deformaci za studena, vyvolává však náchylnost k mezikrystalové korozi. Tvoří karbidy s chromem, čímž dochází ke snižování obsahu chromu v tuhém roztoku. *Dusík* zvyšuje pevnostní charakteristiky bez vlivu na snížení odolnosti k mezikrystalové korozi při obsahu do 0,2%. Zvyšuje stabilitu struktury tím, že zpomaluje precipitaci karbidů a snižuje na minimum odmíšení chromu. Částečně také nahrazuje Ni. [1], [4]

#### 1.4.5 Vliv prostředí žíhací pece na vlastnosti žáruvzdorných ocelí

Oxid uhličitý a zejména vodní pára působí na žáruvzdorné oceli oxidačně a mohou způsobit větší opal než vzduch (*oblast ohřevu plynovými hořáky mezi muflí a vyzdívkou*).

*V oblasti ochranné atmosféry inertního plynu* dochází ke spalování neodstraněných zbytků epoxidové pryskyřice, čímž uniká do atmosféry značné množství uhlíkatých látek. Chrom svou značnou afinitou k uhlíku podporuje jeho pohlcování v atmosféře, pokud je ocel v austenitickém stavu. Naopak křemík brání procesu nauhličování. Nikl podporuje pohlcování uhlíku jen nepřímo tím, že dává chromovým ocelím austenitickou strukturu. Cr-Ni oceli do 10% Ni s přísadou Si lze použít asi do 900°C i v nauhličujícím prostředí. Při vyšších teplotách se austenitické chromniklové žáruvzdorné oceli v nauhličujícím prostředí neosvědčují. Značné nauhličení oceli může zmenšit odolnost proti opalu a je škodlivé hlavně z důvodu snížení teploty tání dané oceli a její houževnatosti. [1], [3]

Železo se neslučuje s molekulárním dusíkem, nýbrž jen s dusíkem atomárním, který vzniká např. tepelný rozkladem čpavku. Cr, Mn, Al a Ti se slučují také s molekulárním dusíkem a jejich vzniklé nitridy jsou stálé i při vyšších teplotách (až nad 1000°C). Chromniklové oceli při vysokých teplotách pohlcují dusík a v jejich struktuře se pak objevují jehlicové nitridy. Rostoucí obsah Ni brání pohlcování dusíku, které je od asi 36%Ni nepatrné. Obohacování dusíkem nezhoršuje žáruvzdornost, pokud je dusík rozpuštěn v austenitu. [1]

#### 1.4.6 Svařování austenitických žáruvzdorných ocelí

Austenitické vysokolegované oceli se svařují zásadně bez předeřevu s cílem vyloučit vznik trhlin za horka v TOO a ve svarovém kovu. Svařování probíhá s minimálním tepelným příkonem do hodnoty 1,5 kJ.mm<sup>-1</sup>. Při svařování zcela austenitických ocelí lze využít elektrody se zvýšeným obsahem Ni a s velmi nízkým obsahem nečistot (P a S). Interpass teplota by neměla přesáhnout teplotu 150°C. Hloubka svarové lázně by měla být max. 1,5. K potlačení nauhličení se využívá svařování ochrannými plyny s obsahem CO<sub>2</sub> do 2,5% obj. Doporučuje se svařovat metodou TIG. Z důvodu propalu prvků se využívají přídatné materiály legované Mo a Cr. Po svařování oceli není nutné tepelné zpracování. Náchylnost k trhlínám za horka lze kontrolovat pomocí vzorce:

$$\Delta H = -700\%C + 17\%Cr - 37\%Ni + 29\%Mo + 188 [-] \quad (1)$$

V případě, že hodnota  $\Delta H$  je menší než 100, je ocel náchylná k tvorbě trhlin za horka. [1], [5]

*Problémy při svařování:* za vyšších teplot dochází k austenitickým nestabilizovaným ocelím ke snížení odolnosti proti mezikrystalové korozi, mezi 450-850°C dochází k intenzivní tvorbě karbidů chromu  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  po hranicích zrn za současné denudace (ochuzování o chrom) v přilehlých oblastech. Dalším problémem je náchylnost ke vzniku karbidických a intermetalických fází v TOO, kde může také docházet k procesu mikrosegregace fosforu a síry podél dendritů a hranic zrn. [5]

#### 1.4.7 Austenitická žáruvzdorná ocel X8CrNi25-21 (1.4845)

Ocel 1.4845 patří do skupiny nestabilizovaných austenitických žáruvzdorných ocelí, které vynikají vysokou odolností proti korozi a velmi dobrými mechanickými vlastnostmi při zvýšených teplotách. Nejsou feromagnetické, mají vysokou tažnost a relativně vysokou pevnost v tahu. I když je ocel náchylná na vylučování fáze sigma, je dostatečně odolná proti poškození v důsledku termálních cyklů a odlupování, zvláště v prostředí s vysokými rychlostmi proudění plynů. Odolnost oxidované vrstvy se snižuje se zvyšující se teplotou. Kritická teplota je 1 100 C°. Slitina má pouze střední odolnost proti sirnému prostředí, především díky vyššímu obsahu niklu. Dalšími faktory ovlivňujícími odolnost této slitiny jsou nauhličování a vytvoření povrchové vrstvy uhlíku. Použití je zvláště vhodné pro plynové pece, pro parní kotle, ropná zařízení a ochranné trubky termočlánků.

Pro určení základní struktury austenitických ocelí lze využít např. izotermických řezů stanovených pro různé teploty v závislosti na obsahu Cr, Ni a dalších přísadových prvků. K orientačnímu výpočtu slouží empirické vzorce [2]:

$$Ni_{eq} = \%Ni + \%Co + 0,5\%Mn + 30\%C + 0,3\%Cu + 25\%N \quad [\%] \quad (2)$$

$$Cr_{eq} = \%Cr + 2\%Si + 1,5\%Mo + 5\%V + 5,5\%Al + 1,75\%Nb + 1,5\%Ti + 0,75\%W \quad [\%]$$

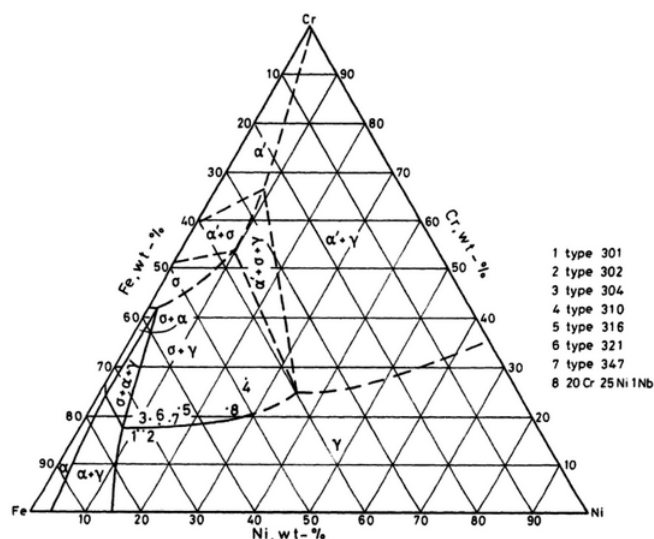
(3)

Tabulka 1 - Chemické složení oceli 1.4845 <sup>9</sup>

[%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	ostatní
max. 0,10	max. 1,50	max. 2,00	max.0,045	max.0,015	24-26	19-22	max. 0,11	-

Pro výpočet jsem použil max. hodnoty dle uvedené tabulky dané oceli. Dosažením do vzorce (2) jsem získal hodnoty  $Ni_{eq} = 28,75\%$  a do vzorce (3) hodnotu ekvivalentu  $Cr_{eq} = 29\%$ . Dle izotermických řezů (viz Obr. 5) při  $650^{\circ}C$  obsahuje ocel 1.4845 fáze  $\sigma$  a  $\gamma$ .



Obrázek 5 – Izotermické řezy při  $650^{\circ}C$  systému Cr-Fe-Ni <sup>2</sup>

Tabulka 2 - Vybrané mechanické vlastnosti oceli 1.4845 <sup>9</sup>

Výrobek	Tloušťka	HB max. 1)	Mez kluzu $R_{p0,2}$ MPa	Pevnost v tahu MPa 1)	A % min.		
					Dlouhé výrobky	Ploché výrobky $a \geq 3$	
						L	Q
ploché v.	$a \leq 75$	192	210	500-700	35	35	35

<sup>1)</sup> U tyčí a profilů tloušťky  $\leq 35$  mm tažených za studena se hodnoty HB mohou zvýšit o 100 jednotek a hodnoty pevnosti v tahu o 200MPa. Hodnota prodloužení se sníží na 20%. L- podélný směr zkoušení, Q – příčný směr zkoušení

Tabulka 3 - Informativní průměrné hodnoty meze tečení pro prodloužení 1% při zvýšených teplotách <sup>9</sup>

Mez tečení 1% pro 1000h - N/mm <sup>2</sup>				Mez tečení 1% pro 10000h – N/mm <sup>2</sup>				Mez tečení 1% pro 100000h – N/mm <sup>2</sup>			
600°C	700°C	800°C	900°C	600°C	700°C	800°C	900°C	600°C	700°C	800°C	900°C
100	45	18	10	90	30	10	4				

Tabulka 4 - Informativní průměrné hodnoty meze pevnosti při tečení při zvýšených teplotách <sup>9</sup>

Mez pevnosti při tečení pro 1000h – N/mm <sup>2</sup>				Mez pevnosti při tečení pro 10000h – N/mm <sup>2</sup>				Mez pevnosti při tečení pro 100000h – N/mm <sup>2</sup>			
600°C	700°C	800°C	900°C	600°C	700°C	800°C	900°C	600°C	700°C	800°C	900°C
170	80	35	15	130	40	18	8,5	80	18	7	3

**Tabulka 5 - Informativní údaje o fyzikálních vlastnostech oceli <sup>9</sup>**

Hustota [kg/dm <sup>3</sup> ]	Teplotní součinitel délkové roztažnosti ( $\alpha$ ) 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> (nebo $\mu\text{m/m/}^{\circ}\text{C}$ ) mezi 20°C a					Tepelná vodivost W/(m.K)		Měrné teplo kJ/(kg.K)
7,9	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C	při 20°C	při 500°C	při 20°C
	15,5	17	17,5	18,5	19,0	15	19	0,50

Teoretický výpočet prodloužení  $\Delta L$  žihací mufle při ohřevu z teploty 20°C na teplotu 820°C ( $\Delta T$ ), výška mufle 3,125m ( $L_0$ ),  $\alpha = 18,5 \mu\text{m/m/}^{\circ}\text{C}$  [2]:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad [\mu\text{m}] \quad (4)$$

$$\Delta L = 18,5 \cdot 3,125 \cdot 800 = 46250 \mu\text{m} = \mathbf{46,3mm}$$

#### 1.4.8 Zhodnocení žihací mufle z hlediska konstrukčního a materiálového

Z hlediska pravidelně se vyskytujících závad a *konstrukčního řešení* pecí jsem shledal jako hlavní nedostatky, které výrazně ovlivňují životnost a plynulý chod žihacích pecí:

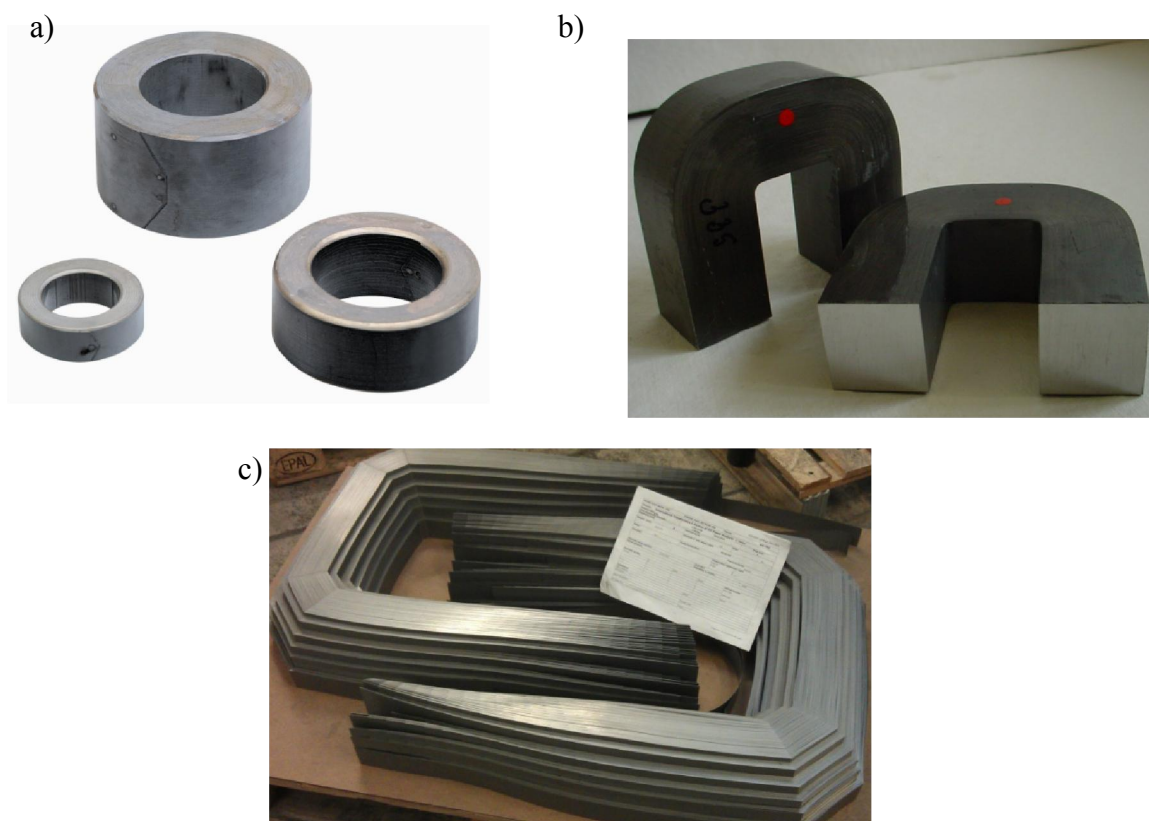
- nevhodné umístění plynových hořáků (všechny tři hořáky jsou ve stejné výšce, což má za následek výrazné místní tepelné zatížení mufle. Možnosti řešení: zabezpečit rovnoměrnější teplotní zatížení mufle pomocí vhodných pomocných prvků, např. dodatečných pecních ventilátorů – nutný konstrukční zásah zhotovitele stavby,
- uložení mufle do křemičitého písku, vzhledem k vypočtenému možnému délkovému prodloužení mufle při dosažení žihací teploty 820°C (výpočet viz vzorec 4), je nutné mít dostatečně poddajný materiál, který bude navíc mít i těsnící vlastnosti pro zachování ochranné atmosféry. Písek časem ztrácí svou schopnost pojmout délkové deformace mufle vlivem postupného stlačení a gravitace. Možnosti řešení: častější kompletní výměna písku, příp. jiný těsnící a poddajnější materiál,
- tloušťka mufle - 6mm, při změně materiálu mufle s vhodnějším chemickým složením a lepšími fyzikálními vlastnostmi (měrné teplo, tepelná vodivost) lze uvažovat také o snížení tloušťky materiálu,

Pro posouzení vhodnosti žáruvzdorné oceli, má kromě legujících prvků významný vliv: složení okolní atmosféry, způsob tepelného namáhání, pevnostní charakteristiky (mez tečení a mez pevnosti při tečení) a strukturní stabilita. Pro ocel 1.4845 jsou negativní vlivy následující:

- při svařování uváděné oceli může vlivem chemického složení (převážně vliv množství uhlíku) docházet ke vzniku trhlin za horka (postup výpočtu v bodě 1.4.6) a také k výskytu mezikrystalové koroze,
- dle vypočteného chromového a niklového ekvivalentu se u oceli při teplotě 650°C dle izotermických řezů vyskytuje také nežádoucí intermetalická fáze sigma, která způsobuje křehkost a snižuje houževnatost oceli (vypočtené hodnoty v bodě 1.4.7), dle Jeníčka, Ryše a Cenka se fáze sigma vyskytuje při delším žihání při teplotách 500-950°C (1966, s. 147),
- ocel se používá při teplotách do 900°C, s opakovaným teplotním zatížením (ohřev a chlazení). Na vnějším plášti je zatěžována CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, vodní párou a O<sub>2</sub> při ohřevu a chlazení, což způsobuje vyšší oxidaci a opal. Na vnitřním plášti je ovlivňována přítomnou dusíkovou atmosférou s nečistotami při spalování (uhlík), která může zapříčinit tvorbu nitridů, čímž se snižuje mez tečení,
- z hlediska meze tečení, meze pevnosti při tečení patří mezi oceli se středními hodnotami s vyšším teplotním součinitelem délkové roztažnosti a tepelnou vodivostí. Pospíšil uvádí, že při přerušovaných zkouškách podléhají oceli bez rozdílu chemického složení a struktury rychlejšímu tečení než při nepřerušovaných zkouškách (1956, s. 63). Z toho usuzují, že stanovené meze tečení jsou pouze orientační a vychází převážně z nepřerušovaných zkoušek.

## 2 PROCESNÍ ROZBOR TRANSFORMÁTOROVÝCH JADER

Společnost AMT má portfolio založeno na výrobcích z orientované křemíkové oceli, tzv. jader magnetických obvodů transformátoru. Jedná se o výrobky vzniklé tvářecími operacemi za studena (tažením, ohýbáním, stříháním) z pásu křemíkového ocelového plechu o jmenovité tloušťce 0,18-0,35mm v požadované šířce. Následné tepelné zpracování se týká produktů zhotovených tvářecími operacemi tažením a ohýbáním pro odstranění vneseného vnitřního pnutí. U formování tahem se jedná o jádra zvaná toroidní a dělená (ukázka výrobků viz Obr. 6a,b). U ohýbání jsou to potom jádra UNICORE (ukázka výrobku viz Obr. 6c)



*Obrázek 6 – Ukázka výrobků AMT: a) toroidní jádra, b) dělené jádro řady SU, c) UNICORE typu DUO*

### 2.1 Obecně o magnetických materiálech

Magnetické vlastnosti materiálu se odvíjí od jeho magnetického stavu. Magnetický stav materiálu má atomový původ a je hlavně určen elektrony atomů. Z magnetického

hlediska je každý atom charakterizován magnetickým momentem atomu  $\mu_a$ , který se skládá ze tří příspěvků:

- a) orbitální pohyb elektronů po dráze kolem jádra atomu,
- b) spin elektronů (tzv. vnitřní magnetický moment),
- c) vnější magnetické pole ovlivňující pohyb elektronů kolem jádra.

Magnetický moment je vektorová veličina, tj. má svou velikost a svůj směr. Magnetický materiál se skládá z velkého počtu atomů, jeho magnetický projev popisujeme magnetizací  $M$ , která udává vektorový součet magnetických momentů všech atomů. Pomocí magnetizace  $M$ , magnetické susceptibility  $\chi$  a intenzity vnějšího magnetického pole  $H$  lze rozdělit magnetické materiály do tří základních skupin:

- 1) diamagnetické látky,  $\chi < 0$  (magneticky neuspořádané),
- 2) paramagnetické látky,  $\chi > 0$  (magneticky neuspořádané),
- 3) feromagnetické, ferimagnetické  $\chi \gg 0$  (magneticky uspořádané). [10], [11]

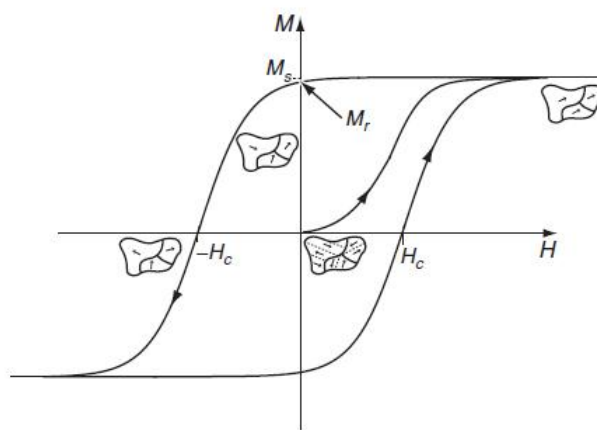
## 2.2 Feromagnetické materiály

Základem feromagnetických materiálů je železo, kobalt a nikl. Podle Weissovy teorie feromagnetismu vytvářejí skupiny atomů v látkách malé oblasti, které nazýváme **domény**. Tyto oblasti jsou navzájem odděleny tzv. Blochovými stěnami, kde dochází ke změně směru magnetického momentu. Molekulární pole související se silami mezi jednotlivými atomy vyvolává v doménách nasycenou spontánní magnetizaci, při které se magnetické momenty všech atomů v doméně uspořádají paralelně do jednoho směru. Jednotlivé domény mají ovšem různě uspořádané magnetické momenty. Po vložení magnetického pole se momenty všech domén orientují ve směru vnějšího pole a po jeho zrušení nedojde ke kompletnímu návratu všech domén do původní pozice. Zahříváním se atomy feromagnetika od sebe oddalují, počet atomů s paralelní orientací magnetických momentů klesá a při dosažení Curieovy teploty (např.  $T_c$  pro železo je 1043K) zanikají domény a tím se ztrácí feromagnetické vlastnosti látky. Feromagnetický materiál se dále dělí na magneticky měkké a magneticky tvrdé materiály. Hlavním určujícím kritériem pro rozdělení je koercitivní intenzita  $H_c$ . U magnetických měkkých materiálů se požaduje co nejnižší koercivita (obvykle méně než 100 A/m), u magneticky tvrdých materiálů co největší (obvykle nad 100 000 A/m). Existuje také podtřída tvrdých materiálů tzv. polotvrdé magnetické materiály s koercivitou mezi 1000-100 000 A/m. Tvrdé magnetické materiály mají hysterezní smyčku čtvercovou  $M(H)$  a po nasycení zůstávají



v magnetickém stavu, kdežto měkké magnetické materiály mají velmi úzkou hysterezní smyčku a při ztrátě pole snadno ztrácejí magnetizaci. [10], [11], [14], [15]

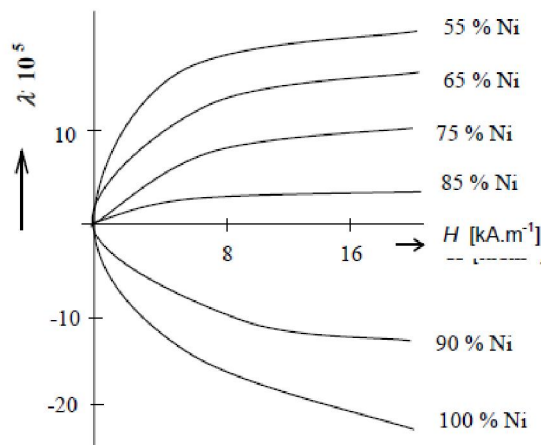
**Hysterezní smyčka** je uzavřená magnetizační křivka, která vyjadřuje závislost  $B = f(H)$  při pomalé, plynulé změně intenzity magnetického pole. Kombinuje informace o magnetických vlastnostech, spontánní magnetizaci  $M_s$ , která existuje v oblasti feromagnetu a dvou vnějších vlastností, remanenci  $M_r$  a koercivity  $H_c$ , které závisí na řadě faktorů – tvaru vzorku, povrchové drsnosti, mikroskopických defektů a tepelné historie. Na obr. 7 je vyobrazena hysterezní smyčka feromagnetického materiálu se znázorněním magnetických domén v jednotlivých stavech. [14], [15]



Obrázek 7 – Hysterezní smyčka feromagnetika s vyznačením domén <sup>14</sup>

**Magnetická anizotropie** se projevuje u feromagnetických materiálů v odlišnosti magnetických vlastností u jejich krystalů v různých krystalografických směrech. Např. u krystalu  $\alpha$  Fe s BCC (KSC) mřížkou je směrem snadného magnetování směr jeho osy (100), směr méně snadného magnetování (110) a nejméně snadné magnetování směr (111). Anizotropie se vytváří v průběhu výroby magnetického materiálu nejčastěji působením silného magnetického pole nebo mechanického napětí (válcováním, tažením) ve směru hlavní osy. Vznikne tak usměrněná (anizotropní) struktura materiálu a tím i anizotropní magnetické vlastnosti. [15]

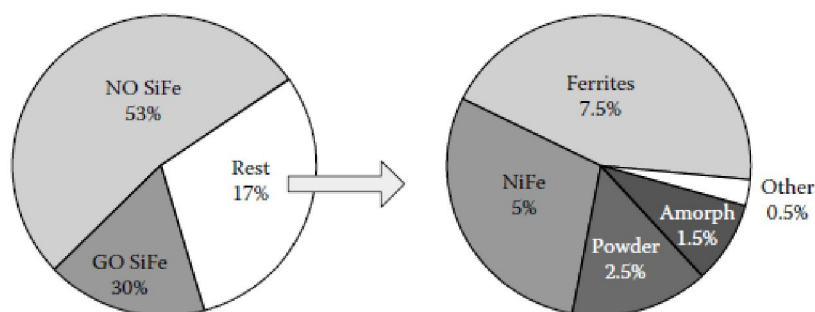
**Magnetostrikce** je jev, při kterém působením magnetického pole na feromagnetický materiál vznikají délkové a objemové změny. Hodnotí se součinitelem  $\lambda$ , který se zvětšuje se vzrůstající se intenzitou magnetického pole (Obr. 8 – magnetostrikce slitin Fe-Ni). U materiálů s pozitivní magnetostrikcí, jako je železo, způsobuje mírné pružné roztahení zlepšení magnetických vlastností. Po překročení určité hranice dochází ovšem ke zhoršení magnetických vlastností. Plastická deformace je u magneticky měkkých materiálů vysloveně škodlivá tím, že zvyšuje hysterezní ztráty. [13], [15]



Obrázek 8 – Koefficienty magnetostrickce  $\lambda$  pro různé slitiny Fe-Ni v závislosti na  $H$  <sup>15</sup>

## 2.3 Magneticky měkké materiály

Drápal ve své publikaci uvádí, že vlastnosti magneticky měkkých materiálů mohou být ovlivněny přítomností legujících prvků, nečistot, velikostí zrn, napětím, radiací, tlakem, deformačním zpevněním, fázovými přeměnami a krystalografickou orientací zrn (1976, s. 116). Vzhledem k významu různých skupin měkkých materiálů je zapotřebí poznamenat, že více než 80% trhu zaujímá křemíková ocel SiFe (viz Obr. 9). Vyrábí se v množství větším než 7 milionů tun ročně a představuje přibližně 1% celosvětové produkce oceli. [11], [14]



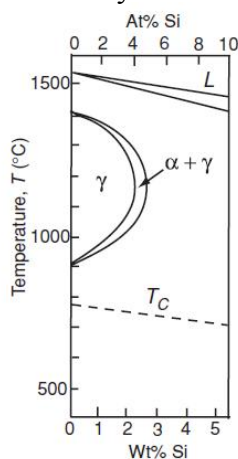
Obrázek 9 – Složení průměrné roční produkce magneticky měkkých materiálů <sup>11</sup>

Nejdůležitější vlastnosti magneticky měkkých materiálů jsou:

- nízké hysterezní ztráty ( $P_h$ , snadný pohyb domén během magnetizace),
- nízké ztráty vířivými proudy vyvolanými změny toku ( $P_v$ ),
- vysoká počáteční a maximální permeabilita ( $\mu_i$ ,  $\mu_{max}$ ),
- malá koercitivní intenzita ( $H_c$ ),
- vysoké hodnoty nasycení magnetické indukce ( $B_s$ ),
- nízká magnetostrickce ( $\lambda$ ),
- úzká hysterezní smyčka.

Volba magneticky měkkého materiálu je kompromisem mezi polarizací, permeabilitou, ztrátami a náklady. Polarizace by měla být co největší pro dané excitační pole a ztráty v jádře musí být přijatelné k provozní frekvenci. Přísady do slitin jako uhlík, křemík nebo hliník snižují ztráty a zvyšují permeabilitu. K nežádoucím účinkům legujících prvků patří snížení maximálního magnetického nasycení (zvýšení hodnoty nasycení lze získat přísadou kobaltu, slitiny s 35% Co dosahují nasycení  $J_s$  až 2,42T). Proto pro jednotlivé aplikace existují různé magneticky měkké materiály. Např. nízkouhlíkové oceli se používají pro levné motory ve spotřebitelských výrobcích (pračky, vysavače apod.). [12], [13], [14]

Pro lepší elektrický výkon je vhodné legovat křemíkem, protože 4%Si stačí k fázovému přechodu  $\alpha \rightarrow \gamma$  v železe, což umožňuje válcování plechu za tepla (viz Obr. 10). Více o křemíkových ocelích v kap. 2.4. Kromě slitin na bázi Si-Fe existují také slitiny Ni-Fe, které vynikají vysokou permeabilitou, která se dosahuje řízeným tepelným zpracováním. Slitiny s 30-80% Ni mají strukturu  $\gamma$  FCC (KPC). Jednou ze slitin je typ Ni80Fe20, u kterého se anizotropie a magnetostrikce blíží k nulovým hodnotám, což zapříčiňuje vysoké hodnoty



Obrázek 10 – SiFe fázový diagram <sup>14</sup>

permeability. Mezi další slitiny patří Co-Fe, železité prášky, amorfní slitiny, měkké ferity, spinelové ferity, YIG (yttrium iron garnet) materiály. Přehled vybraných magneticky měkkých materiálů dle aplikace viz Tab. 6. [12], [13], [14]

Tabulka 6 - Vlastnosti magneticky měkkých materiálů pro nízkofrekvenční aplikace <sup>14</sup>

Material	Name	$\mu_i$	$\mu_{max}$	$J_s$ (T)	$H_c$ (A m <sup>-1</sup> )
Fe	Soft iron	300	5 000	2.15	70
Fe <sub>49</sub> Co <sub>49</sub> V <sub>2</sub>	V-permendur	1 000	20 000	2.40	40
Ni <sub>50</sub> Fe <sub>50</sub>	Hypernik	6 000	40 000	1.60	8
Ni <sub>77</sub> Fe <sub>16.5</sub> Cu <sub>5</sub> Cr <sub>1.5</sub>	Mumetal	20 000	100 000	0.65	4
Ni <sub>80</sub> Fe <sub>15</sub> Mo <sub>5</sub>	Supermalloy	100 000	300 000	0.80	0.5
a-Fe <sub>40</sub> Ni <sub>38</sub> Mo <sub>4</sub> B <sub>18</sub>	Metglas 2628SC	50 000	400 000	0.88	0.5
Fe <sub>73.5</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> Si <sub>13.5</sub> B <sub>9</sub>	Finmet	50 000	800 000	1.25	0.5

## 2.4 Křemíková orientovaná ocel

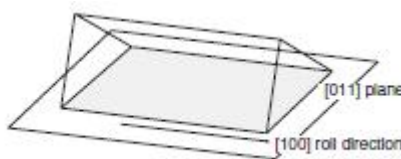
### 2.4.1 Konvenční křemíková orientovaná ocel (CGO)

Vynález křemíkové oceli v roce 1902 Robertem Hadfieldem byl významnou událostí pro magnetické měkké materiály, stejně jako patentování Gossovy struktury Normanem Gossem v roce 1934. Hadfield zjistil, že 6,5% Si zaručuje slitině výrazně vyšší elektrický odpor a téměř nulovou magnetostrikci. Negativní stránkou ovšem byla velmi vysoká tvrdost a křehkost, což způsobovalo problémy při válcování a děrování finálního plechu. Proto se v praxi využívá oceli s obsahem křemíku 2,7 až 3,3%. Vyšší obsah křemíku nejen že zvyšuje elektrický odpor a snižuje jak anizotropii, tak magnetostrikci železa, ale také negativně snižuje magnetickou indukci a permeabilitu. Škodlivými prvky v ocelích SiFe jsou uhlík, kyslík, síra a dusík, které zapříčiňují nárůst hysterezních ztrát. Mají také vliv na tvorbu přesyceného tuhého roztoku v  $\alpha$  Fe, kterým dávají předpoklad ke stárnutí (precipitace karbidů, nitridů a oxidů). Výchozí materiál by měl být proto co nejčistší, obsah těchto prvků po zpracování by měl být menší než 10ppm. [11], [14]

Zlepšení magnetických vlastností je dosaženo také krystalografickou orientací zrn označovanou jako *textura*. Dosahuje se jí kombinací tváření a válcování. Pásky křemíkové oceli mohou být izotropní, s malou texturou nebo anizotropní. Směr válcování je stejný se směrem snadné magnetizace (100). Dle způsobu tváření a textury se rozlišují oceli:

- válcované za tepla, izotropní – obsah 3,5-4,6% Si,
- válcované za studena, izotropní – obsah cca 2,5% Si,
- válcované za studena, anizotropní – obsah cca 3% Si.

Anizotropní orientované křemíkové oceli se vyrábějí v tvaru tenkých pásů o tloušťce 0,23-0,35mm s orientovanou Gossovou texturou (viz Obr. 11) nebo kubickou strukturou. Je snaha dosáhnout uspořádání velkých zrn v jednom směru. Optimální úhel náklonu zrna je  $2^\circ$ , u konvenčního materiálu je to okolo  $6^\circ$ . Povrch jednotlivých plechů je opatřen oboustranným izolačním povlakem např. Kerizol, LITE Carlite. Oceli se používají ve střídavých magnetických obvodech (relé, transformátory, točivé stroje). [11], [15]

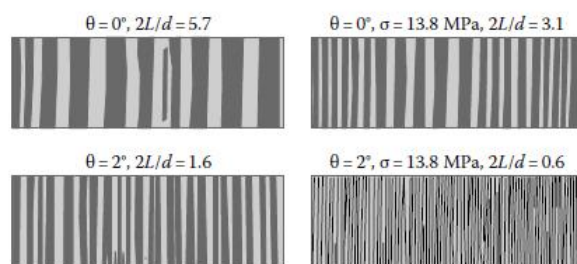


Obrázek 11 – Gossova struktura křemíkové orientované oceli<sup>14</sup>

V AMT se z CGO oceli vyrábějí převážně dělená C-jádra a jádra UNICORE. Norma ČSN EN 10107 rozděluje konvenční materiály do několika jakostí z hlediska specifických ztrát a minimální polarizace. Jakosti jsou označeny kombinací písmen a číslic. První písmeno M znamená elektrickou ocel, tři číslice po prvním písmeni označují hodnotu stonásobku specifických ztrát měřené při magnetické indukci 1,7T. Další dvě číslice za pomlčkou znamenají stonásobnou tloušťku materiálu a poslední písmeno S značí standardní, konvenční materiál. Tak např. materiál M130-30S má specifické ztráty při  $B_{\max}$  1,7T –  $P_s$  max. 1,3W/kg při tloušťce materiálu 0,30mm. [16], [17]

#### 2.4.2 Křemíková orientovaná ocel s vysokou permeabilitou (HGO)

V roce 1965 vyvinula jedna z předních japonských společností zabývající se výrobou transformátorové oceli Nippon Steel Corporation novou technologii pro výrobu HGO oceli. Oproti konvenčním materiálům, u kterých se používají inhibitory na bázi MnS, se při vývoji HGO materiálu použilo jako inhibitoru nitridů AlN. Výsledkem je dokonalejší Gossova textura s úhlem náklonu  $2^\circ$ - $3^\circ$  a většími rozměry zrn (více než 10mm). Materiál díky tomu vykazuje nižší hodnoty specifických ztrát při vyšší magnetické indukci, což musí být dosaženo i při výrazně nižší intenzitě magnetického pole. Účinek správné orientace zrna může být oslabován širokým rozstupem stěn domén (viz Obr. 12), proto je často HGO materiál vyráběn s podpůrným zdokonalováním domén, např. laser scribing, laser scratching, plasma jet irradiation<sup>1</sup>. [11]



**Obrázek 12 – Struktura domén v 3% krystalů FeSi <sup>11</sup>**  
( $\theta$  – úhel náklonu,  $2L$  – vzdálenost doménových stěn,  $d$  – tloušťka)

Označení jakostí HGO materiálů podle normy ČSN EN 101 07 je podobné jako u CGO materiálů, kromě koncového písmene, kde se místo S nachází P. Ve společnosti AMT se z 90% využívá materiál HGO pro výrobu toroidních jader. [17]

<sup>1</sup> Laser scribing, laser scratching, plasma jet irradiation – bezkontaktní technologie zaměřené na snížení ztrát jádra křemíkové orientované oceli. Dochází ke zjemnění domény. Vytváří se větší počet menších domén, což snižuje ztrátu výkonu během procesu magnetizace. Hlavní výhodou procesu je, že nepoškozuje integritu izolačního povlaku. Materiál upravený pomocí těchto metod je určen převážně pro výrobu jader, která se dále tepelně nezpracovávají (např. step-lap, uncore). Následujícím tepelným procesem by byly snížené hodnoty ztrát získané použitou technologií degradovány.[11]

## 2.5 Chemické složení a typické mechanické a fyzikální vlastnosti CRGO

Tabulka 7 - Typické vlastnosti CRGO: a) mechanické, b) fyzikální <sup>18</sup>

a)

Typical Mechanical Properties of GOES					
Property	Angle to Rolling Direction				
	0°	20°	45°	55°	90°
0.2% Offset Yield Strength ksi MPa	47.5 328	45.4 313	49.8 343	51.1 352	49.7 343
Ultimate Tensile Strength ksi MPa	52.3 361	49.0 338	54.6 376	54.4 375	58.7 405
Percent Elongation in 2"	11	13	3	4	30
Modulus of Elasticity 106 psi 103 MPa	15.5 107	17.8 123	29.5 203	29.1 201	25.3 175
Rockwell Hardness 15T	85	85	85	85	85

b)

TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES	
Electrical Resistivity 20°C (68°F)	48 Microhm-cm
Thermal Coefficient of Resistivity 20-145°C (70-300°F)	0.047 Microhm-cm/°C
Thermal Conductivity 20-600°C 1100°F	70- 0.0715 Cal/cm <sup>2</sup> •Sec•°C/cm 207.4 Btu/ft <sup>2</sup> •Hr•°F/in
Heat Capacity	0.12 Cal/g/°C (Btu/lb/°F)
Thermal Expansion 20-100°C 20-300°C 20-500°C 20-700°C 20-900°C 20-1065°C	11.9•10 <sup>-6</sup> •cm/cm/°C 12.9•10 <sup>-6</sup> •cm/cm/°C 13.6•10 <sup>-6</sup> •cm/cm/°C 14.2•10 <sup>-6</sup> •cm/cnVC 14.6•10 <sup>-6</sup> •cm/cm/°C 15.3•10 <sup>-6</sup> •cm/cm/°C
Density	7.65 g/cm <sup>3</sup> 0.28 lbs/in <sup>3</sup>
Saturation Induction	20350 Gauss 2.035 Tesla
Curie Temperature	730°C (1350°F)

Tabulka 8 - Chemické složení CRGO <sup>19</sup>

	C	Mn	Si	P	S	Al <sub>tot</sub>	Cu	Cr	Ni	N <sub>2</sub>	Ti	Ti+Nb+V
min. %	0,023	0,22	3,10			0,012	0,45			0,0085		
max. %	0,033	0,28	3,25	0,014	0,01	0,018	0,55	0,06	0,06	0,0125	0,006	0,015

## 2.6 Elektromagnetické vlastnosti jader

Měřicí zařízení pro kontrolu elektromagnetických vlastností umístěná v AMT jsou zhotovená společností SYBAS Control, jedná se o plně automatické zařízení pro měření magnetických obvodů elektrických strojů, jako jsou toroidní jádra, dělená jádra, UNICORE jádra, jádra pravoúhlá, jádra tvaru EI a I. Měřicí metoda je založena na vybuzení měřeného magnetického obvodu střídavým proudem do primární měřicí cívky o stanovém počtu závitů a změření střídavého napětí na této cívce, příp. změření naindukovaného střídavého napětí na cívce samostatné (tzv. sekundární). Magnetické veličiny jsou vypočteny z naměřených údajů výrazně nesinusového střídavého budoucího proudu a naindukovaného střídavého napětí. Níže uvádím parametry kontrolované na měřícím zařízení:

- intenzitu magnetického pole efektivní ( $H_{\text{eff}}$ ) a maximální ( $H_{\text{max}}$ ) v jednotkách A/m,
- magnetickou indukci ( $B_{\text{max}}$ ) v jednotkách T,



- zdánlivý výkon ( $S$ ) v jednotkách VA,
- ztráty v jádře ( $P_{fe}$ ) v jednotkách W,
- permeabilitu  $\mu$  v jednotkách [-],

Všechny uvedené elektromagnetické vlastnosti jsou výrazně ovlivněny správným tepelným zpracováním. Ve své práci jsem využil pro hodnocení vlivu úpravy teplotní křivky naměřené elektromagnetické veličiny, a to: hodnotu dosažené magnetické indukce ( $B_{max}$ ) při stanovených hodnotách intenzitě magnetického pole ( $H_{eff}$ ) a hodnotu specifických ztrát ( $P_s$ ) při stanovené hodnotě magnetické indukce ( $B_{max}$ ).

## 2.7 Zjednodušený postup výroby jader magnetických obvodů v AMT

Jak je zmíněno na začátku kapitoly 2, jedná se o dvě používané technologie výroby jader magnetických obvodů ve společnosti AMT z hlediska způsobu namáhání, a to tahem resp. ohybem. *Tahové namáhání – zjednodušený postup výroby toroidních jader:*

- podélné dělení vstupního materiálu na potřebné šířky pásku v tloušťce 0,18-0,35mm v jakostech CGO a HGO,
- navíjení na poloautomatických strojích, obepnutí pásy okolo navíjecího trnu, jeho formování pomocí přítlačné kladky, brzdících válečků a desek. Na začátku, konci a mezi jednotlivými přechody různých šířek pásek využívání svarového spoje metodou TIG (ukázka strojů viz Obr. 13),
- žihání v šachtových pecích dle předepsané teplotní křivky,
- měření elektromagnetických vlastností v měřicích cívkách na kontrolním zařízení,
- balení.



Obrázek 13 – Navíjecí stroje v AMT: a) toroidní jádra – TRIOM, b) dělená jádra – ELVAC

Zjednodušený postup výroby dělených jader:

- totožné s výrobou toroidních jader,
- vakuová impregnace jednosložkovou epoxidovou pryskyřicí,

- e) sušení impregnovaných jader na teplotu 180°C po stanovenou dobu,
- f) řezání na kotoučových a rozbrušovacích pilách,
- g) dle požadavků také broušení, příp. lapování řezných ploch (vliv na výsledné elektromagnetické vlastnosti),
- h) kontrola a úprava předepsaných rozměrů dle výkresové dokumentace,
- i) měření elektromagnetických vlastností v měřicích cívkách na kontrolním zařízení,
- j) balení.

Navíjecí zařízení jsou převážně prototypy, které byly zhotoveny dle požadavků na výrobní kapacitu zařízení a předepsané tolerance jader magnetických obvodů. Jádra jsou při navíjení vlivem brzdících sil nejdříve elasticky a poté plasticky deformována, čímž dochází k vysokému vnitřnímu pnutí. Je narušena mikrostruktura vstupního materiálu, což má za následek znehodnocení výstupních elektromagnetických vlastností jader. Proto je zapotřebí po operaci navíjení u jader odstranit vnitřní pnutí a vrátit strukturu a deformace do původního stavu. Bez následného tepelného zpracování jsou jádra nepoužitelná pro implementaci do magnetických obvodů. Následující operace vakuová impregnace a řezání vlivem použité technologie také zhoršují výstupní elektromagnetické vlastnosti jader. To však není předmětem řešení této práce.

Výrobky *namáhané na ohyb* jsou vyráběny na speciálních zařízeních zvaných UNICORE, kde dochází k postupnému ohýbání a vrstvení jednotlivých plechů na sebe vedoucí k dosažení požadovaných rozměrů (ukázka výrobku, viz Obr. 6c). V místě ohybu je materiál značně plasticky deformován. Hodnota deformace vyjádřena elektromagnetickými vlastnostmi resp. hodnotou specifických ztrát je o 20% horší než normou stanovená hranice u použité jakosti základního materiálu. Proto část zákazníku trvá na nutnosti jádra UNICORE po formování ještě tepelně zpracovat, aby dosáhla co nejlepších vlastností.

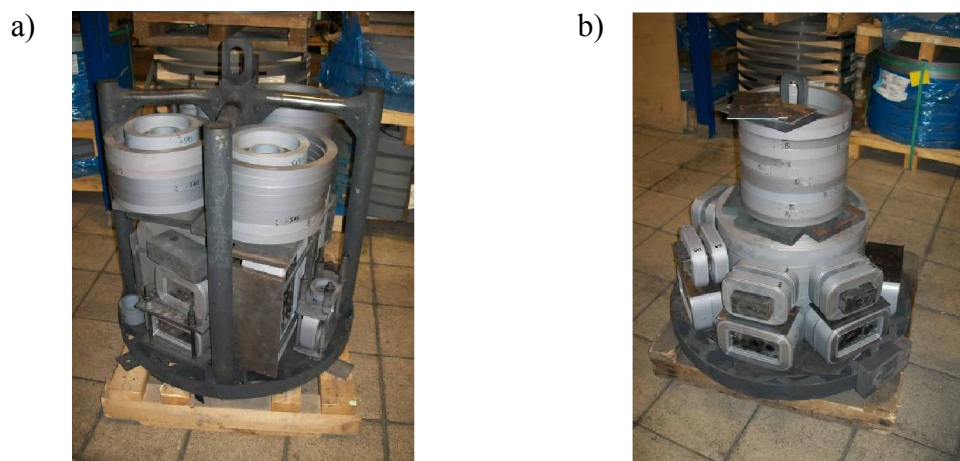
## **2.8 Tepelné zpracování jader magnetických obvodů**

Žihání se zařazuje mezi druh tepelného zpracování, jehož výsledkem je rovnovážná struktura podle stavového diagramu nebo blízké struktury rovnovážné. Tepelné zpracování jader magnetických obvodů spadá do kategorie žihání bez rekrytalizace. Proces probíhá pod teplotami fázových přeměn. Základní proces žihání se skládá ze tří fází: ohřev na žihací teplotu, výdrž na žihací teplotě a ochlazování na teplotu okolí. Teplota žihání má být co nejvyšší, aby doba žihání byla co nejkratší a maximálně se využila kapacita žihacích pecí. Je nutné ovšem přihlídnout ke struktuře a velikosti zrna žihaného materiálu a také



vstupnímu formátu žíhaného materiálu (např. u utažených svitků tenkých materiálů může docházet vlivem velkých teplot ke vzájemnému nežádoucímu slepování závitů). Výdrž na žíhací teplotě může být od několika sekund až po několik desítek hodin. To ovlivňuje způsob žíhání (doba žíhání), výšku žíhací teploty, hmotnost vsázky a velikost deformace vzniklé v předchozích operacích. Ohřátí materiálu je vždy snadnější záležitostí než jeho ochlazování. Rychlost ochlazování je závislá pouze na tepelné vodivosti materiálu o dané hmotnosti v daném prostředí a teplotním spádu. [20]

Konstrukce, popis a použití šachtových pecí je uvedeno v bodě 1. Nutnost tepelného zpracování jader je zdůvodněna v předchozích odstavcích. Navinutá jádra se ukládají na žíhací čocky (nosnost každé z těchto žíhacích čockek je 1500 kg) tak, aby prostor na čockách byl rovnoměrně využit. Systém ukládání jader je od nejtěžších ve spodních řadách až po nejlehčí v řadách horních. Výrobky se musí ukládat vždy tak, aby nepřesahovaly přes vnější průměr žíhací čocky. Pro maximální využití místa se malá jádra ukládají do vnitřních průměrů větších jader a menší jádra určená pro měřicí transformátory se ukládají do posledních horních vrstev. Při žíhání je součástí dělených jader také navíjecí trn (materiál trnů 12 050), toroidní a UNICORE jádra jsou tepelně zpracovávána bez trnů. Dělená jádra se dále zatěžují srovnávacími deskami. Na obr. 14a,b je vyobrazena nachystaná horní a dolní čocka s jádrem pro naložení do pece. Do pece se uloží nejdříve spodní čocka, na ní se posadí horní.



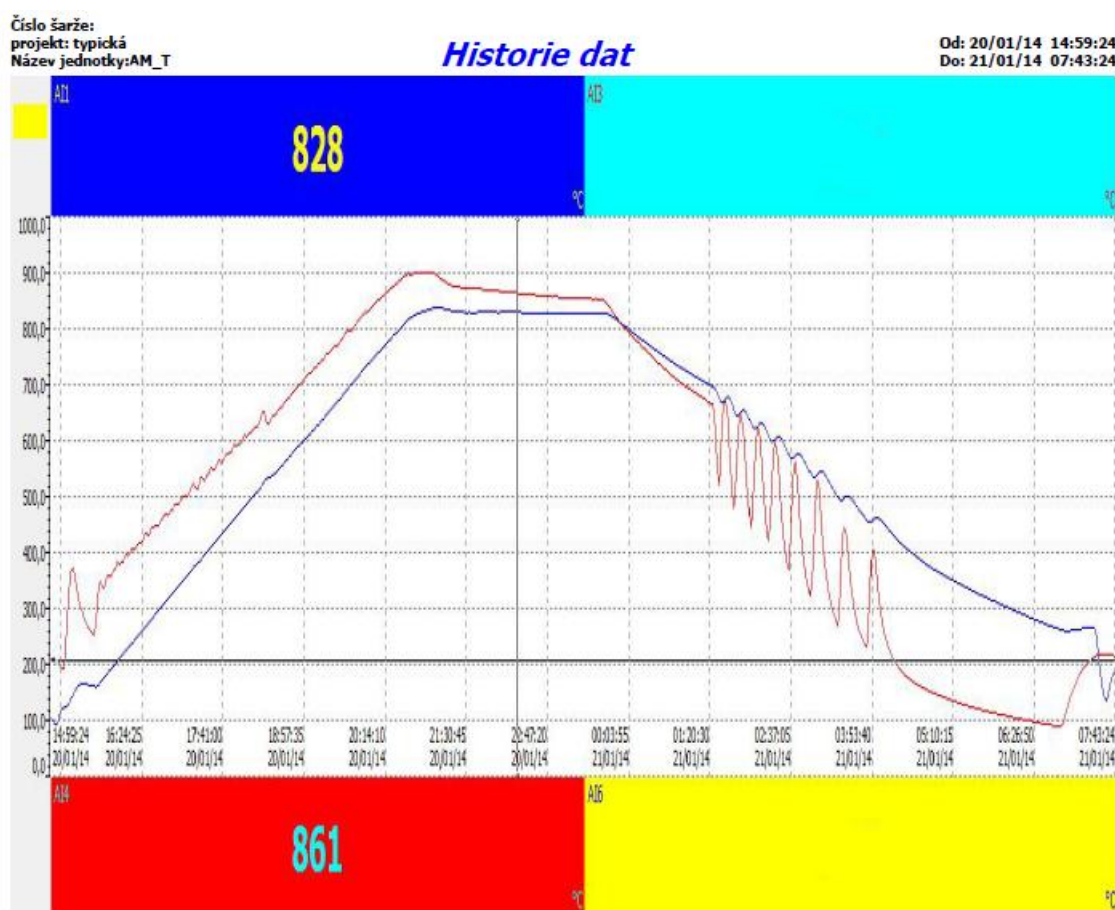
*Obrázek 14 – Připravené žíhací čocky pro založení do pece: a) spodní, b) horní*

### **2.8.1 Křivka tepelného zpracování výrobků z GOES v AMT**

- 1.krok – ohřev a následný proplach  $N_2$  atmosféry při teplotě  $150^{\circ}C$ , čas 1hod,
- 2.krok – plynulý ohřev na žíhací teplotu  $820^{\circ}C$ , čas 5hod (krok po  $134^{\circ}C/hod$ ),
- 3.krok – žíhání na teplotě  $820^{\circ}C$ , čas 3hod,

- 4.krok – pomalé chlazení na 710°C, čas 1hod 20min,
- 5.krok – pomalé chlazení na 590°C, čas 1hod 20min,
- 6.krok – chlazení na 490°C, čas 1hod,
- 7.krok – chlazení na 400°C, čas 1hod,
- 8.krok – chlazení na 350°C, čas 1hod,
- 9.krok – chlazení na 250°C, čas 1hod

Na obr. 15 je znázorněn typický průběh tepelného zpracování výrobků z anizotropní orientované křemíkové oceli. Modře vyznačená křivka ukazuje teploty v prostoru vsázky a červeně vyznačená křivka teploty v blízkosti plynových hořáků. ***Celkový čas žitání se pohybuje mezi 16-18hod. Průměrné spotřeby jednotlivých médií na cyklus tepelného zpracování: zemní plyn: 200-250m<sup>3</sup>, elektrická energie: 55-65kWh, zkapalněný dusík: 22-25kg***



Obrázek 15 – Typická křivka tepelného zpracování získaná ze zapisovače Brainchild

### **2.8.2 Ochranná atmosféra N<sub>2</sub>**

Při procesech tepelného zpracování se musí zabránit nežádoucím reakcím povrchu zpracovávaného materiálu se vzdušným kyslíkem. K tomu se využívá základní inertní médium, dusík. Tepelné zpracování v dusíkové atmosféře propůjčuje danému materiálu lepší vzhled, zabraňuje zokoujení a prokazatelně zlepšuje lesklost materiálu. [11]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tepelné zpracování výrobků z orientované křemíkové oceli ve společnosti AMT v nynější podobě vychází z dat získaných postupným vývojem a testováním na přelomu let 2007/2008, kdy byly pece instalovány. V průběhu následujících několika let výrobci GOES neustále zlepšovali výrobní proces, čímž docházelo také ke zlepšování garantovaných elektromagnetických vlastností vyráběných ocelí. Proto i výsledné vlastnosti výrobků z uváděných ocelí byly a jsou lepší. To vytvořilo tlak na potřebu urychlit proces tepelného zpracování výrobků z GOES s cílem snížit výrobní náklady a získat konkurenční výhodu.

Zdokonalením procesu žíhání lze dosáhnout nejen finančních, ale také kapacitních úspor. V experimentální práci jsem se zaměřil na praktickou aplikaci několika návrhů úprav žíhacího cyklu s ohledem na doporučení uvedené v odborné literatuře a orientačních výpočtů z hlediska teplot a časů výdrže v jednotlivých částech cyklu. Hlavními sledovanými ukazateli byly: spotřeba médií v jednotlivých částech žíhacího cyklu, celková doba tepelného zpracování a vliv na výsledné elektromagnetické vlastnosti. Pro porovnání elektromagnetických vlastností byla vybrána zakázka toroidních jader jednotného rozměru, která byla rovnoměrně rozdělena mezi standardní a navrhované žíhací režimy.

#### 3.1 Návrhy teplotních křivek

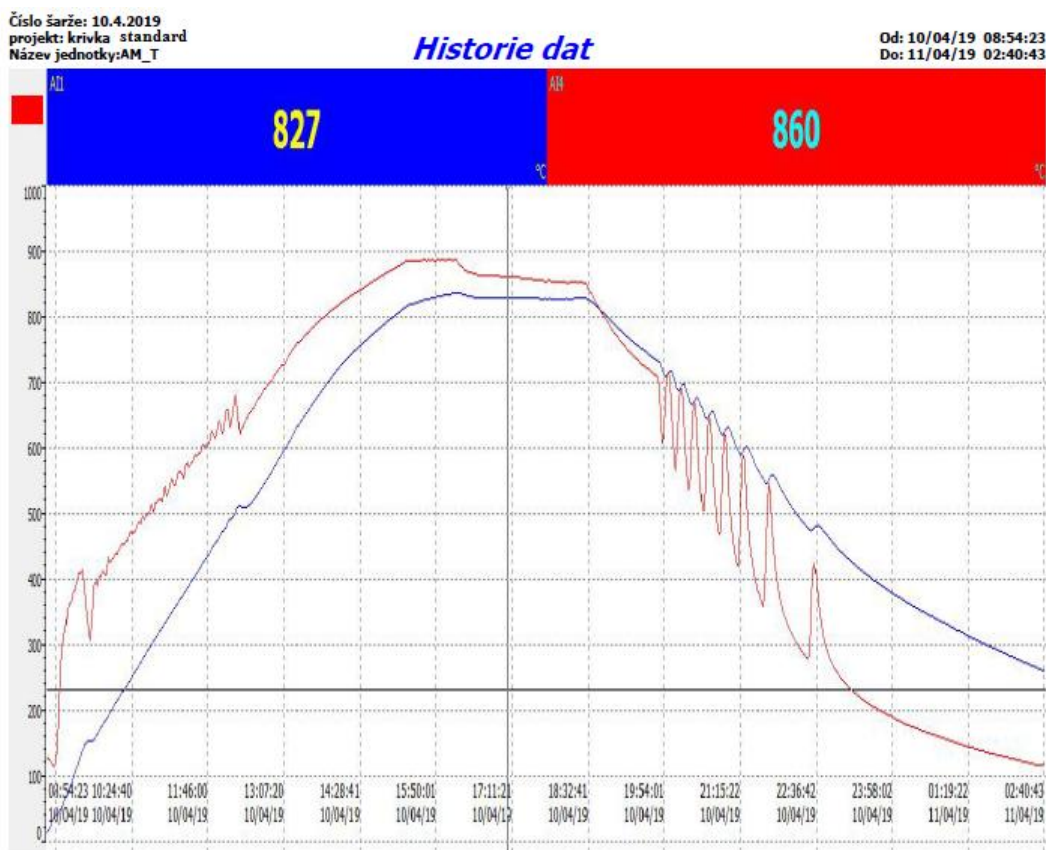
Z hlediska doporučených podmínek pro žíhání k odstranění vnitřního pnutí u výrobků z křemíkové orientované oceli uvádí ve výrobní dokumentace výrobce GOES německá společnost ThyssenKrupp, že teplota žíhání se má nacházet v rozmezí 820-840°C při výdrži 2hod, chlazení do 300°C, doporučená ochranná atmosféra N<sub>2</sub>. Čas ohřevu, doba výdrže a chlazení je závislá na typu, velikosti pece a množství žíhaného materiálu. Rychlé chlazení může zapříčinit vznik deformací. Žíhání by mělo probíhat bez výskytu organických látek, který způsobují nauhličení (v řešeném případě se to týká vypalování zbytků pryskyřic z navíjecích trnů). Další výrobce GOES, americká společnost AK Steel doporučuje, aby se teplota žíhání pohybovala v rozmezí teplot 790-800°C, při výdrži nejméně 2hod, rychlost ohřevu a chlazení opět závisí na typu pece a velikosti vsázky. Tepelný příkon pece by měl být nastaven tak, aby rychlost ohřevu nebyla příliš vysoká při blížící se teplotě žíhání. Doporučená rychlost chlazení 85°C/hod z teploty 750°C, odstranění jader z pece možné při teplotě 325-375°C. Korejský výrobce POSCO uvádí, že teplota žíhání by měla být v rozmezí teplot 780-840°C s výdrží mezi 1,5-2,5hod.

s přihlédnutím k použité peci a způsobu vytápění, aby došlo ke kompletnímu ohřátí na stanovenou teplotu celé vsázky. Rychlost ohřevu a chlazení musí být řízeno tak, aby nedocházelo k deformacím. Podle čínského výrobce oceli Baosteel by měla být teplota žhání CRGO v rozmezí 780-820°C, rychlost ohřevu a chlazení nemá vliv na elektromagnetické vlastnosti, ale na možný vznik deformací. Doba ohřevu závisí na velikosti a tvaru vsázky. [22], [23], [24], [25]

### 3.1.1 Žihací křivka - standard

Kroky standardní křivky jsou uvedeny v bodě 2.8.1. Proces byl proveden při vsazce o celkové hmotnosti 2300kg s maximálním průřezem jádra 59,5cm<sup>2</sup>. Průběh křivky – viz Obr. 16. Za hodnotící kritéria jsem stanovil:

- spotřeba zemního plynu v jednotlivých úsecích tepelného procesu [m<sup>3</sup>],
- celková spotřeba zemního plynu [m<sup>3</sup>],
- celková spotřeba elektrické energie [kWh],
- elektromagnetické vlastnosti – splnění předepsaných limitních hodnot,
- celkový čas žhání [hod],
- maximální dosažená teplota v peci při výdrži na žihací teplotě [°C].



Obrázek 16 – Průběh tepelného zpracování – standardní křivka

V Tab. 9 jsou uvedeny hodnotící kritéria pro standardní režim.

**Tabulka 9 - Hodnotící kritéria u standardní teplotní křivky**

Spotřeba zemního plynu			
Úsek	Teplota [°C]	Čas [hod]	Spotřeba [m³]
ohřev	150-820	5	95
výdrž	820	3	100
chlazení	820-300	6	15
Celkem		14	210
Spotřeba elektrické energie [kWh]			
celý režim	55		
Elektromagnetické vlastnosti – viz Příloha A			
Měřicí bod	Limitní hodnota	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
H <sub>eff</sub> 30A/m	B <sub>max</sub> min.1,6T	1,7788T	0,0256T
H <sub>eff</sub> 3A/m	B <sub>max</sub> min.0,11T	0,1422T	0,0121T
B <sub>max</sub> 1,7T	P <sub>s</sub> max. 1,05W/kg	0,8953W/kg	0,0595W/kg
Maximální dosažená teplota v peci při výdrži			860°C

## Orientační výpočty procesních parametrů standardní křivky

### a) Zařazení vsázky dle tloušťky výrobků

Pro zařazení vsázky z hlediska tloušťky výrobků mezi tenké nebo tlusté tělesa jsem použil výpočty dle Kremera (1974, s. 56) platné pro ohřev tenkých těles v peci s konstantní teplotou. I když průběh tepelného zpracování výrobků z křemíkové orientované oceli je proces ohřevu s proměnnou teplotou, pro orientační výpočet k zařazení ohříváných výrobků mezi tenká nebo tlustá tělesa dle Biotova kritéria jsem u pece počítal s konstantním teplotou  $t_{pec}$  860°C. Biotovo kritériu pro tenká tělesa je  $B_i \leq 0,25$ , pro tlustá  $B_i \geq 0,5$  a pro přechodná  $0,25 < B_i < 0,5$ . U přibližných výpočtů se přechodná tělesa zařazují mezi tenká. Počáteční teplota  $t_0$  tělesa byla 20°C,  $t_k$  konečná min. teplota tělesa 800°C [21]

Výpočet průměrné teploty výrobku [21]

$$\bar{t} = t_{pec} + \frac{t_0 - t_k}{2,3 \log \frac{t_{pec} - t_0}{t_{pec} - t_k}} = 860 + \frac{20 - 800}{2,3 \log \frac{860 - 20}{860 - 800}} = 564^\circ\text{C} \quad (5)$$

### Výpočet průměrného tepelného toku [21]

(předpoklad, že konvekcí se přenáší 10% celkového tepla)

$$q = 1,1 \cdot 5,67 \cdot \left( \frac{t_{pec} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\bar{t} + 273}{100} \right)^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (6)$$
$$q = 1,1 \cdot 5,67 \cdot \left( \frac{860 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{564 + 273}{100} \right)^4 = 72168 \text{ W/m}^2$$

### Výpočet celkového součinitele přestupu tepla (průměr během ohřevu) [21]

$$\overline{\alpha_\Sigma} = \frac{q}{t_{pec} - \bar{t}} = \frac{72168}{860 - 564} = 244 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (7)$$

### Výpočet Biotova kritéria [21]

$$Bi = \frac{\overline{\alpha_\Sigma} \cdot b}{\lambda_m} = \frac{244 \cdot 0,035}{25,14} = 0,34 \quad (8)$$

kde  $b$  je výpočtová tloušťka ohřivaného materiálu (polovina tloušťky stěny žíhaných jader, v řešeném případě u toroidního jádra 400/260x85 se jednalo o tloušťku 70 mm, tzn.  $b = 0,035$  m),  $\lambda_m$  je tepelná vodivost křemíkové orientované oceli = 25,14 W/(m.K). [26]

Z orientačních výpočtů jsem zjistil, že tepelně zpracovávané jádra magnetických obvodů o max. průřezu 59,5cm<sup>2</sup> se zařazují mezi tělesa přechodná, pro přibližné výpočty k ověření teplot a časů u jednotlivých žihacích křivek je možné použít vzorce platné pro tenká tělesa dle doporučení dle Kremera (1974, s. 35). [21]

### **b) Výpočet teploty tenkého tělesa po ohřevu v peci s proměnnou teplotou**

Pro výpočet teploty tělesa (toroidního jádra s průřezem 59,5cm<sup>2</sup>) na konci ohřevu jsem vycházel z teplotní standardní křivky s počáteční teplotou  $t_{pec,o} = 250^\circ\text{C}$  (teplota pece po kroku č. 1), s teplotním krokem  $Z = 128^\circ\text{C/hod}$  (max. teplota spalin 890°C, přepočtená hodnota hodinového teplotního kroku) a časem ohřevu  $\tau = 5\text{hod}$  a ze vzorců dle Kremera (1974, s. 61). Měrná hmotnost  $\rho = 7650 \text{ kg/m}^3$ , měrná tepelná vodivost  $c = 0,486 \text{ kJ/(kg.K)}$ . [26], [21]

#### Výpočet průměrné teploty spalín [21]

$$T_{sp} = \frac{t_{pec,0} + (\tau \cdot Z)}{2} = \frac{250 + (5 \cdot 128)}{2} = \mathbf{445 \text{ } ^\circ\text{C}} \quad (9)$$

#### Výpočet průměrného součinitele přestupu tepla [21]

$$\alpha_{s+k} = 0,105 \cdot \left(\frac{T_{sp}}{100}\right)^3 + 11,5 \text{ až } 17,5 \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (10)$$

$$\alpha_{s+k} = 0,105 \cdot \left(\frac{445 + 273}{100}\right)^3 + 12,5 = \mathbf{51,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}$$

#### Výpočet součinitele m [21]

$$m = \frac{\alpha_{s+k} \cdot k}{b \cdot \rho \cdot c} = \frac{51,4 \cdot 0,992}{0,035 \cdot 7650 \cdot 0,486} = \mathbf{0,39} \quad (11)$$

kde  $k$  je součinitel tvaru tělesa zachycující poměr hmotností ohřivaného kovu  $m_h$  k jeho povrchové ploše  $S_m$ , pro obecná tělesa platí:

$$\frac{m_h}{S_m} = \frac{b \cdot \rho}{k} \rightarrow k = \frac{b \cdot \rho \cdot S_m}{m_h} \quad (12)$$

kde u vybraného výrobku, toroidního jádra 400/260x85 (vnější průměr/ vnitřní průměr x výška) jsou hmotnost  $m_h = 47,5\text{kg}$  a plocha  $S_m$  je součet obvodových ploch vnitřních a vnějších (místa, kde dochází k ohřevu).

$$S_m = S_{m1} + S_{m2} = (\pi \cdot D \cdot h) + (\pi \cdot d \cdot h) \quad [\text{m}^2] \quad (13)$$

$$S_m = (\pi \cdot 0,4 \cdot 0,085) + (\pi \cdot 0,26 \cdot 0,085) = \mathbf{0,176 \text{ m}^2}$$

po dosažení do (12)

$$k = \frac{b \cdot \rho \cdot S_m}{m_h} = \frac{0,035 \cdot 7650 \cdot 0,176}{47,5} = \mathbf{0,992}$$

#### Výpočet teploty jádra s max. průřezem po fázi ohřevu [21]

$$t = t_{pec,0} + Z \cdot \tau - Z \cdot \frac{1}{m} - \left(t_{pec,0} - t_0 - Z \cdot \frac{1}{m}\right) \cdot e^{(-m \cdot \tau)} \quad [^\circ\text{C}] \quad (14)$$

$$t = 250 + 128 \cdot 5 - 128 \cdot \frac{1}{0,39} - \left(250 - 150 - 128 \cdot \frac{1}{0,39}\right) \cdot e^{(-0,39 \cdot 5)} = \mathbf{594 \text{ } ^\circ\text{C}}$$



### c) Výpočet času výdrže na žíhací teplotě u standardní křivky

Standardní křivka žíhání má nastavenou výdrž na 3hod při dosažené teplotě vsázky  $t_k$  820°C. Výpočtem jsem si ověřil, zda z vypočtené teploty vsázky po ohřevu  $t_o = 594^\circ\text{C}$  bude dostačující čas výdrže 3hod. Pro výpočet jsem použil vzorec uvedený Kremerem (1974, s. 56) pro ohřev tenkých těles v peci s konstantní teplotou (počítal jsem při max.  $t_{pec} = 890^\circ\text{C}$ ) [21]

$$\tau = \frac{b \cdot \rho \cdot c}{k \cdot \alpha_\Sigma} \cdot \ln \frac{t_{pec} - t_o}{t_{pec} - t_k} \quad [\text{hod}] \quad (15)$$

Výpočet průměrného tepelného toku  $q$  dosazením do vzorce (6)

$$q = 1,1 \cdot 5,67 \cdot \left( \frac{890 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{594 + 273}{100} \right)^4 = 78860 \text{ W/m}^2$$

Výpočet celkového součinitele přestupu tepla  $\alpha_\Sigma$  dosazením do vzorce (7)

$$\alpha_\Sigma = \frac{q}{t_{pec} - \bar{t}} = \frac{78860}{890 - 564} = 266 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

při dosažení do vzorce (15) jsem vypočetl min. potřebný čas výdrže na teplotě 820°C

$$\tau = \frac{0,035 \cdot 7650 \cdot 0,486}{0,992 \cdot 266} \cdot \ln \frac{890 - 594}{890 - 820} = 0,71 \text{ hod} \cong 43 \text{ min}$$

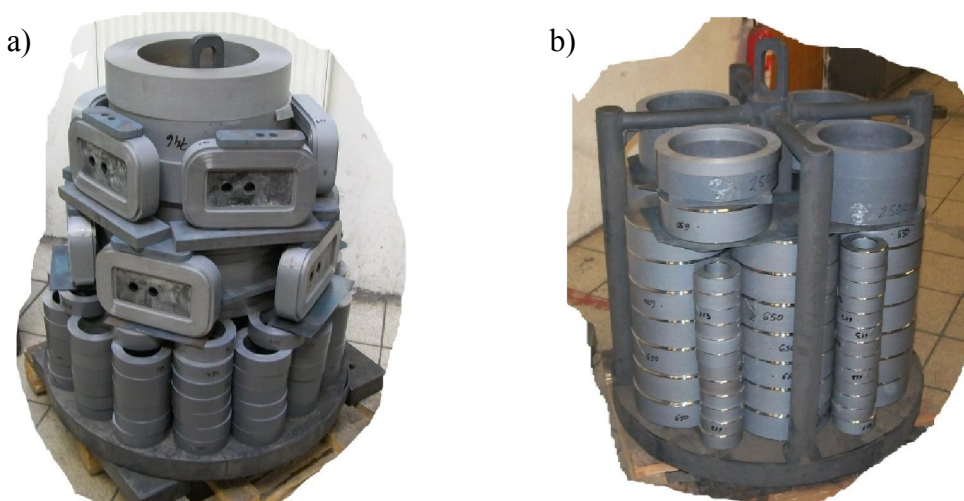
Z teoretických přibližných výpočtů jsem zjistil, že při navržené náběhové křivce ohřevu dosáhl výrobek o testovaném max. průřezu na konci 5hodinového ohřevu teploty 594°C. Minimální výdrž na žíhací teplotě 820°C byla výpočtem stanovena na dobu 43 min.

#### 3.1.2 Návrh žíhací křivky č. 1

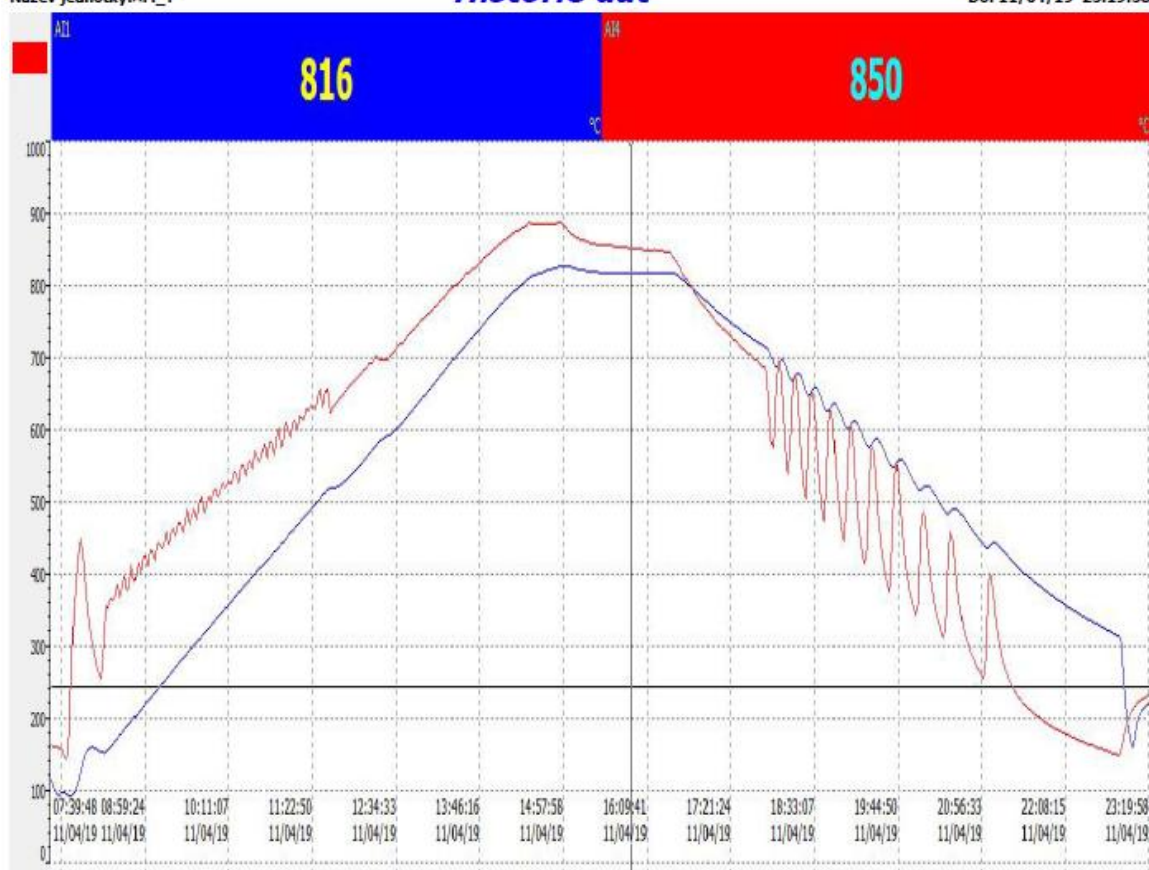
Při stanovení první teplotní křivky jsem vycházel z doporučení výrobců a teoretických výpočtů doby ohřevu. Ohřev jsem zvolil pomalejší oproti standardní křivce s nastavením teplotního kroku 110°C/hod, žíhací teplotu jsem snížil na hodnotu 810°C s výdrží 2hod a chlazení ustanovil se spádem 85°C/hod. Rozpis jednotlivých kroků tepelného zpracování, viz níže. Proces byl proveden při vsazce o celkové hmotnosti 2147kg (viz Obr. 17) s maximálním průřezem jádra 59,5cm<sup>2</sup> (standardně se vyrábějí jádra s průřezem okolo

36cm<sup>2</sup>, pro test bylo vhodnější použít co největší možný průřez k ověření dostatečného prohřátí materiálu při zvoleném času výdrže 2hod na žíhací teplotě). Grafické znázornění průběhu je na Obr. 18.

- 1.krok – ohřev a následný proplach N<sub>2</sub> atmosféry při teplotě 150°C, čas 1hod,
- 2.krok – plynulý ohřev na teplotu 370°C, čas 2hod (krok po 110°C/hod),
- 3.krok – plynulý ohřev na teplotu 590°C, čas 2hod (krok po 110°C/hod),
- 4.krok – plynulý ohřev na teplotu 810°C, čas 2hod (krok po 110°C/hod),
- 5.krok – výdrž na teplotě 810°C, čas 2hod
- 6.krok – pomalé chlazení na 640°C, čas 2hod (krok po 85°C/hod),
- 6.krok – pomalé chlazení na 470°C, čas 2hod (krok po 85°C/hod),
- 7.krok – pomalé chlazení na 300°C, čas 2hod (krok po 85°C/hod),
- 8.krok – pomalé chlazení na 250°C, čas 30min.



**Obrázek 17 – Připravené žíhací čočky pro založení do pece pro křivku č. 1: a) horní, b) spodní**



Obrázek 18 – Průběh tepelného zpracování – křivka č. 1

V Tab. 10 jsou uvedeny hodnotící kritéria pro navržený režim – křivka č. 1.

Tabulka 10 - Hodnotící kritéria u navržené křivky č. 1

Spotřeba zemního plynu			
Úsek	Teplota [°C]	Čas [hod]	Spotřeba [m³]
ohřev	150-810	6	122
výdrž	810	2	70
chlazení	810-300	6	13
Celkem		<b>14</b>	<b>205</b>
Spotřeba elektrické energie [kWh]			
celý režim		<b>55</b>	
Elektromagnetické vlastnosti – viz Příloha B			
Měřicí bod	Limitní hodnota	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
H <sub>eff</sub> 30A/m	B <sub>max</sub> min.1,6T	1,7714T	0,0186T
H <sub>eff</sub> 3A/m	B <sub>max</sub> min.0,11T	0,1384T	0,0146T
B <sub>max</sub> 1,7T	P <sub>s</sub> max. 1,05W/kg	0,8998W/kg	0,0444W/kg
Maximální dosažená teplota v peci při výdrži			<b>850°C</b>

## Orientační výpočty procesních parametrů křivky č. 1

Pro výpočet teploty tělesa (toroidního jádra s průřezem  $59,5\text{cm}^2$ ) na konci ohřevu jsem vycházel z navržené teplotní křivky č. 1 s počáteční teplotou  $t_{pec,o} = 250^\circ\text{C}$  (teplota pece po kroku č. 1), s teplotním krokem  $Z = 107^\circ\text{C/hod}$  (max. teplota spalin  $890^\circ\text{C}$ , přepočtená hodnota hodinového teplotního kroku) a časem ohřevu  $\tau = 6\text{hod}$ . Křivka č. 1 měla nastavenou výdrž na 2hod při dosažené teplotě vsázky  $t_k 810^\circ\text{C}$ . Ostatní hodnoty byly použity z předchozích výpočtů u standardní křivky.

### Výpočet teploty jádra s max. průřezem po fázi ohřevu dle vzorce (14)

$$t = 250 + 107 \cdot 6 - 107 \cdot \frac{1}{0,39} - \left(250 - 150 - 107 \cdot \frac{1}{0,39}\right) \cdot e^{(-0,39 \cdot 6)} = 635^\circ\text{C}$$

### Výpočet průměrného tepelného toku dle vzorce (6)

(předpoklad, že konvekcí se přenáší 10% celkového tepla)

$$q = 1,1 \cdot 5,67 \cdot \left(\frac{890 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{635 + 273}{100}\right)^4 = 71707 \text{ W/m}^2$$

### Výpočet celkového součinitele přestupu tepla (průměr během ohřevu) dle vzorce (7)

$$\bar{\alpha}_\Sigma = \frac{q}{t_{pec} - \bar{t}} = \frac{71707}{890 - 564} = 220 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

### Výpočet času výdrže na žíhací teplotě u křivky č.1 dle vzorce (15)

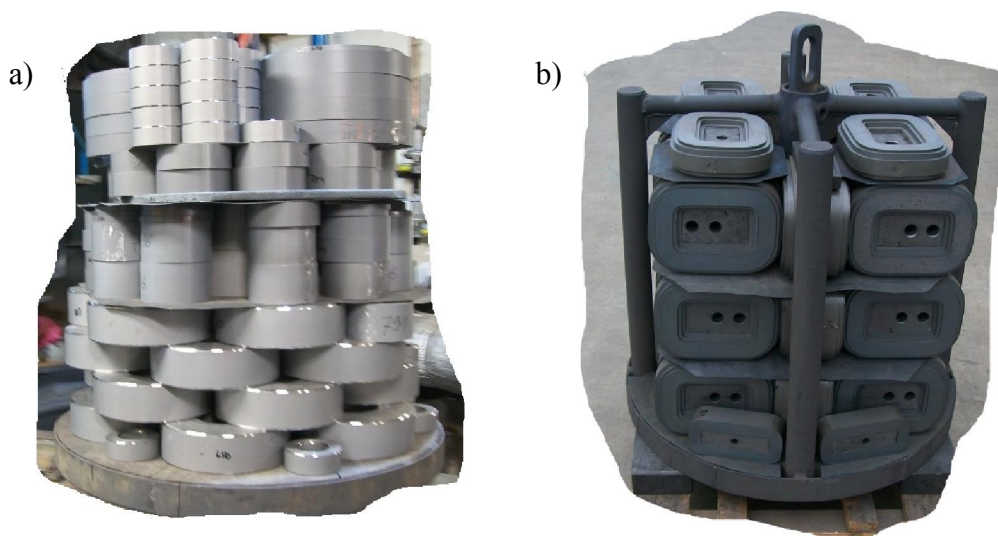
$$\tau = \frac{0,035 \cdot 7650 \cdot 0,486}{0,992 \cdot 220} \cdot \ln \frac{890 - 635}{890 - 810} = 0,69\text{hod} \cong 42 \text{ min}$$

Z teoretických přibližných výpočtů křivky č. 1 jsem zjistil, že při navržené náběhové křivce ohřevu dosáhl výrobek o testovaném max. průřezu na konci 6hodinového ohřevu teploty  $635^\circ\text{C}$ . Oproti standardní křivce došlo při nižší rychlosti ohřevu a nižší teplotě  $^\circ\text{C/h}$  k lepšímu prohřátí jader. Minimální výdrž na žíhací teplotě  $810^\circ\text{C}$  byla výpočtem stanovena na dobu 42 min.

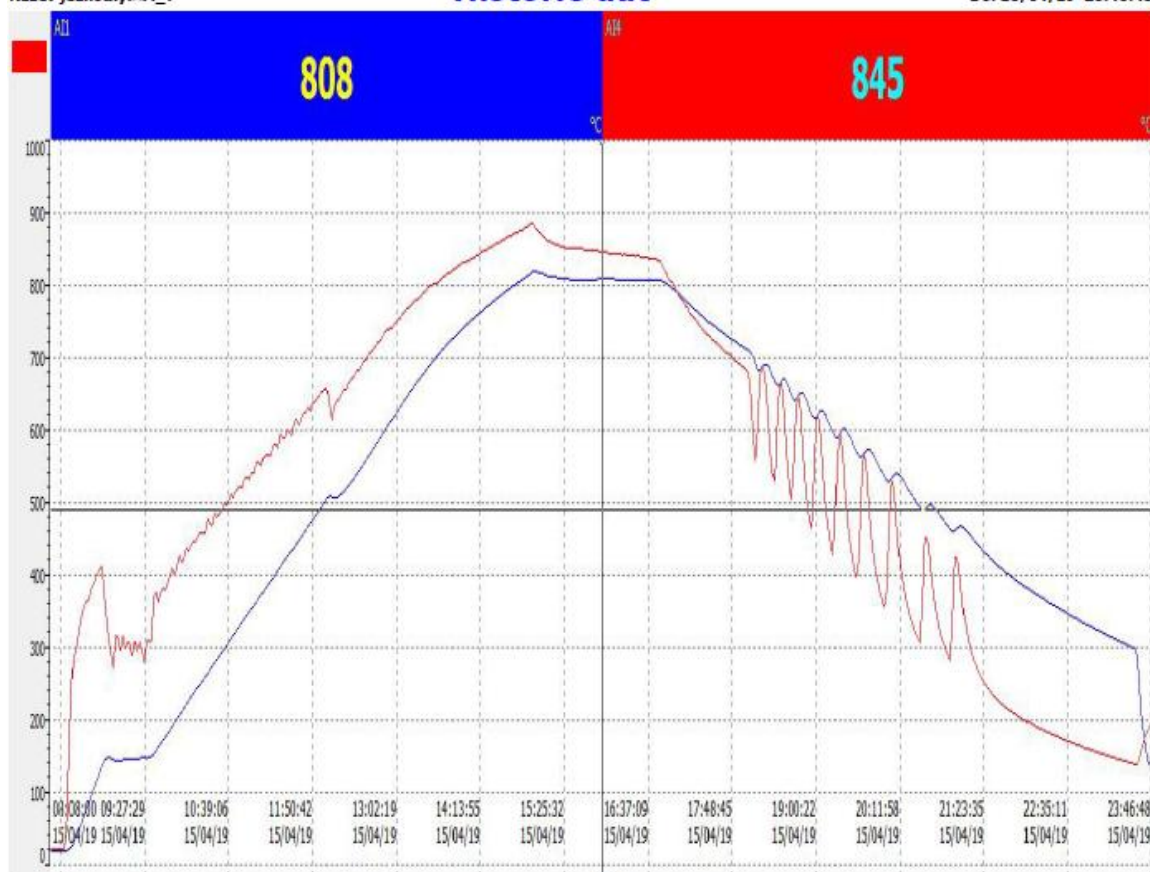
### 3.1.3 Návrh žíhací křivky č. 2

Při návrhu druhé teplotní křivky jsem se zaměřil hlavně na zrychlení procesu ohřevu a snížení žíhací teploty s využitím informací získaných z odborné literatury a z dosažených výsledků průběhu standardní a testovací křivky č. 1. Ohřev jsem zvolil tedy rychlejší oproti standardní křivce s nastavením teplotního kroku  $140^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ , žíhací teplotu jsem snížil na hodnotu  $800^{\circ}\text{C}$  s optimální výdrží 2hod a chlazení jsem ponechal se spádem  $85^{\circ}\text{C}/\text{hod}$  jako u křivky č. 1, jelikož byla progresivnější než u standardního tepelného zpracování. Rozpis jednotlivých kroků tepelného zpracování, viz níže. Proces byl proveden při vsazce o celkové hmotnosti 2190kg (viz Obr. 19) s maximálním průřezem jádra  $59,5\text{cm}^2$  jako v případě křivky č. 1 s důrazem na prověření dostatečného prohřátí objemnějších jader při snížení teploty žíhání na  $800^{\circ}\text{C}$  s výdrží 2hod. Grafické znázornění průběhu je na Obr. 20.

- 1.krok – ohřev a následný proplach  $\text{N}_2$  atmosféry při teplotě  $150^{\circ}\text{C}$ , čas 1hod,
- 2.krok – plynulý ohřev na teplotu  $430^{\circ}\text{C}$ , čas 2hod (krok po  $140^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ ),
- 3.krok – plynulý ohřev na teplotu  $710^{\circ}\text{C}$ , čas 2hod (krok po  $140^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ ),
- 4.krok – plynulý ohřev na teplotu  $800^{\circ}\text{C}$ , čas 40min. (krok po  $140^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ ),
- 5.krok – výdrž na teplotě  $800^{\circ}\text{C}$ , čas 2hod
- 6.krok – pomalé chlazení na  $640^{\circ}\text{C}$ , čas 2hod (krok po  $85^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ ),
- 6.krok – pomalé chlazení na  $470^{\circ}\text{C}$ , čas 2hod (krok po  $85^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ ),
- 7.krok – pomalé chlazení na  $300^{\circ}\text{C}$ , čas 2hod (krok po  $85^{\circ}\text{C}/\text{hod}$ ),
- 8.krok – pomalé chlazení na  $250^{\circ}\text{C}$ , čas 30min.



Obrázek 19 – Naložené žíhací čočky pro křivku č. 2: a) horní před žíhání, b) spodní po žíhání



Obrázek 20 – Průběh tepelného zpracování – křivka č.2

V Tab. 11 jsou uvedeny hodnotící kritéria pro navržený režim – křivka č. 2.

Tabulka 11 - Hodnotící kritéria u navržené křivky č. 2

Spotřeba zemního plynu			
Úsek	Teplota [°C]	Čas [hod]	Spotřeba [m <sup>3</sup> ]
ohřev	150-800	4,5	98
výdrž	800	2	70
chlazení	800-300	6	16
Celkem		<b>12,5</b>	<b>184</b>
Spotřeba elektrické energie [kWh]			
celý režim		<b>50</b>	
Elektromagnetické vlastnosti – viz Příloha C			
Měřicí bod	Limitní hodnota	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
H <sub>eff</sub> 30A/m	B <sub>max</sub> min.1,6T	1,7685T	0,0178T
H <sub>eff</sub> 3A/m	B <sub>max</sub> min.0,11T	0,1368T	0,0138T
B <sub>max</sub> 1,7T	P <sub>s</sub> max. 1,05W/kg	0,9203W/kg	0,0635W/kg
Maximální dosažená teplota v peci při výdrži			<b>845°C</b>

## Orientační výpočty procesních parametrů křivky č. 2

Pro výpočet teploty tělesa (toroidního jádra s průřezem  $59,5\text{cm}^2$ ) na konci ohřevu jsem vycházel z navržené teplotní křivky č. 2 s počáteční teplotou  $t_{pec,o} = 250^\circ\text{C}$  (teplota pece po kroku č. 1), s teplotním krokem  $Z = 142^\circ\text{C/hod}$  (max. teplota spalin  $890^\circ\text{C}$ , přepočtená hodnota hodinového teplotního kroku) a časem ohřevu  $\tau = 4,5\text{hod}$ . Křivka č. 2 měla nastavenou výdrž na 2hod při dosažené teplotě vsázky  $t_k 800^\circ\text{C}$ . Ostatní hodnoty byly použity z předchozích výpočtů u standardní křivky.

### Výpočet teploty jádra s max. průřezem po fázi ohřevu dle vzorce (14)

$$t = 250 + 142 \cdot 4,5 - 142 \cdot \frac{1}{0,39} - \left(250 - 150 - 142 \cdot \frac{1}{0,39}\right) \cdot e^{(-0,39 \cdot 4,5)} = 570^\circ\text{C}$$

### Výpočet průměrného tepelného toku dle vzorce (6)

(předpoklad, že konvekcí se přenáší 10% celkového tepla)

$$q = 1,1 \cdot 5,67 \cdot \left(\frac{890 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{570 + 273}{100}\right)^4 = 82601 \text{ W/m}^2$$

### Výpočet celkového součinitele přestupu tepla (průměr během ohřevu) dle vzorce (7)

$$\overline{\alpha_\Sigma} = \frac{q}{t_{pec} - \bar{t}} = \frac{82601}{890 - 564} = 253 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

### Výpočet času výdrže na žíhací teplotě u křivky č.2 dle vzorce (15)

$$\tau = \frac{0,035 \cdot 7650 \cdot 0,486}{0,992 \cdot 253} \cdot \ln \frac{890 - 570}{890 - 810} = 0,718\text{hod} \cong 43 \text{ min}$$

Z teoretických přibližných výpočtů křivky č. 2 jsem zjistil, že při navržené náběhové křivce ohřevu dosáhl výrobek o testovaném max. průřezu na konci 4,5hodinového ohřevu teploty  $570^\circ\text{C}$ . Při srovnání se standardní křivkou a křivkou č. 1 došlo k nejmenšímu prohřátí jader, čas minimální výdrže na žíhací teplotě pro dosažení teploty vsázky  $800^\circ\text{C}$  vychází stejně jako v předešlých případech okolo 43 min.

### 3.1.4 Srovnání z hlediska naměřených hodnot u provedených testů

Tabulka 12 - Srovnání celkového času žihání, spotřeb médií a max. dosažené teploty

Křivka	Celkový čas žihání sledovaného úseku [hod]	<sup>2</sup> Spotřeba zemního plynu ve sledovaném úseku [m <sup>3</sup> ]	Spotřeba elektrické energie [kWh]	Maximální dosažená teplota v peci při výdrži [°C]
standard	14	210	55	860
křivka č.1	14	205	55	850
křivka č.2	12,5	184	50	845

Při porovnání časů sledovaného úseku žihacího procesu a spotřeby médií se ukázala jako nejlepší varianta navrhovaná křivka č. 2, u které dochází jednak k časové úspoře 1,5hod/cyklus, a také k cca 15% úspoře ve spotřebě zemního plynu a 10% úspoře ve spotřebě elektrické energie. Výrazné je také celkové teplotní zatížení pecních prostor, kde teplota spalin při výdrži u křivky č. 2 je o 15°C nižší než u standardní křivky.

Tabulka 13 – Srovnání z hlediska elektromagnetických veličin

Křivka	Měřicí bod	Limitní hodnota	Střední hodnota $\mu$	Směrodatná odchylka $\sigma$	Gaussovo rozdělení $\langle \mu-2\sigma, \mu+2\sigma \rangle$
standard	$H_{eff}$ 30A/m	$B_{max}$ min.1,6T	1,7788T	0,0256T	98%
	$H_{eff}$ 3A/m	$B_{max}$ min.0,11T	0,1422T	0,0121T	98%
	$B_{max}$ 1,7T	$P_s$ max. 1,05W/kg	0,8953W/kg	0,0595W/kg	96%
křivka č. 1	$H_{eff}$ 30A/m	$B_{max}$ min.1,6T	1,7714T	0,0186T	96%
	$H_{eff}$ 3A/m	$B_{max}$ min.0,11T	0,1384T	0,0146T	100%
	$B_{max}$ 1,7T	$P_s$ max. 1,05W/kg	0,8998W/kg	0,0444W/kg	100%
křivka č. 2	$H_{eff}$ 30A/m	$B_{max}$ min.1,6T	1,7685T	0,0178T	94%
	$H_{eff}$ 3A/m	$B_{max}$ min.0,11T	0,1368T	0,0138T	100%
	$B_{max}$ 1,7T	$P_s$ max. 1,05W/kg	0,9203W/kg	0,0635W/kg	98%

Dle naměřených elektromagnetických veličin při garančních bodech jsem zjistil, že všechna proměřená jádra splňují minimální předepsané parametry u všech teplotních křivek. Dle Gaussova rozdělení určeného pomocí střední hodnoty a směrodatné odchylky se cca 95% naměřených hodnot nachází v intervalu  $\langle \mu-2\sigma, \mu+2\sigma \rangle$ , což ukazuje na homogenitu elektromagnetických vlastností při různých teplotních křivkách.

<sup>2</sup> Spotřeby zemního plynu jsou odečteny z žihacího režimu jedné vsázky, mohou být ovšem zkráceny řídicím systémem pece, který pracuje v dlouhodobém režimu. Nastavení testovacích teplot a času v jednotlivých krocích řídicí systém nevyhodnocuje k momentální velikosti vsázky, ale z historie předešlých žihacích cyklů (dosažení požadované teploty v peci v požadovaném čase nemusí být vždy přesně dodrženo). Ukazatel skutečné úspory spotřeby zemního plynu je možné vyhodnotit až po delším časovém období (např. měsíčním cyklu) s přepočtem na průměrnou hmotnost vsázky.



### 3.1.5 Srovnání z hlediska vypočtených hodnot u provedených testů

Obecně patří ohřev kovů k nejsložitějším tepelně technickým problémům, protože zahrnuje nejen sdílení tepla vně ohřívaného výrobku, tj. přestup tepla ze spalín na povrch kovu za spolupůsobení pecní vyzdívky, ale i šíření uvnitř ohřívaného tělesa. Šíření tepla v pecích obsažených v řešené práci je o to složitější, že přestup tepla v pecním prostoru zahrnuje oblasti mezi třemi hlavními tělesy – plynnou vrstvou, ohřívaným materiálem a pecním zdívem. Plynná vrstva se ještě skládá ze dvou atmosfér a ohřívaný materiál z několika částí (mufle, oběhová vložka, výrobky). Výpočty jsem proto zaměřil na přibližný výpočet teplot tělesa přenášené konvencí po ohřevu (výrobek s maximálním průřezem) a minimální čas výdrže na různé žíhací teplotě. V Tab. 14 jsou jednotlivé dosažené teploty a časy výdrže srovnány pro testované teplotní křivky. [21]

Hlavním důvodem přibližných výpočtů bylo zjistit, jak rychlost ohřevu, délka ohřevu a teplota žíhání ovlivňují celkový průběh tepelného zpracování výrobků z křemíkové orientované oceli. Výsledkem bylo, že i při zvýšené rychlosti ohřevu, která zapříčinila menší prohřátí tělesa, došlo při různých žíhacích teplotách k potřebnému prohřátí tělesa za přibližně stejný časový úsek.

Tabulka 14 - Srovnání dle vypočtených hodnot teplot a časů

Křivka	Čas ohřevu [hod]	Rychlost ohřevu [°C/hod] (přepočtená rychlost dle max. teploty pece)	Vypočtená průměrná teplota jádra po ohřevu [°C]	Teplota žíhání (výdrž) [°C]	Vypočtený min. čas výdrže [min]
standard	5	134 (128)	594	820	43
křivka č.1	6	110 (107)	635	810	42
křivka č.2	4,5	140 (142)	570	800	43

### 3.2 Návrhy úprav konstrukce pece a parametrů mufle

#### 3.2.1 Úpravy konstrukce pece

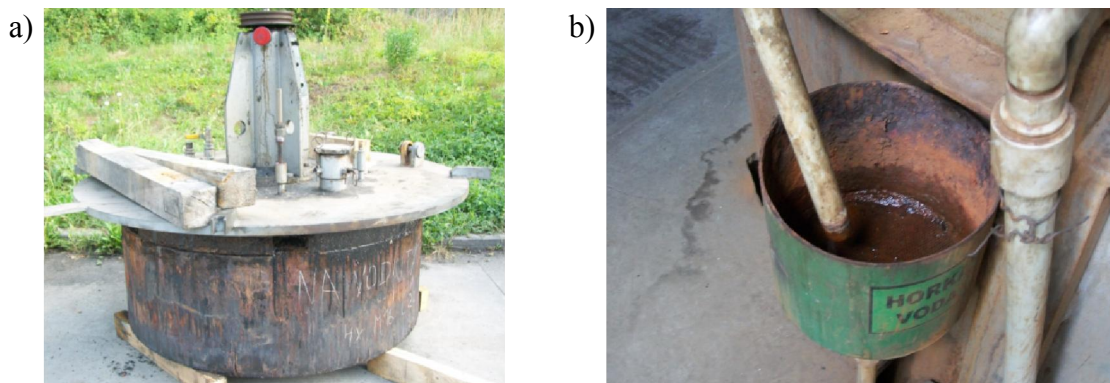
Prvotní vyhodnocení z hlediska konstrukce pece jsem uvedl v bodě 1.4.8. Teplotní zatížení mufle ovlivněné nevhodně umístěnými hořáky se částečně kompenzovalo snížením žíhací teploty z 820°C na 800°C jako výsledek provedených testů teplotních křivek žíhání. Snížením teploty žíhání se také zmenšila celková deformace možného prodloužení mufle. Podle vzorce (4) by se jednalo o pokles deformace okolo 3%. U

problematického uložení spodní části mufle do křemičitého písku, které zapříčiňuje a podporuje *deformaci mufle vlivem teplotního zatížení*, jsem navrhnul *dvě různé varianty řešení*:

a) jak jsem uvedl v bodě 1.4.8, je nutná častější výměna křemičitého písku, který již ztratil svou schopnost tlumit délkové deformace mufle – navrhovaná *četnost výměny 1x měsíčně*,

b) nebo konstrukční zásah do systému uložení spodní části mufle dle Šmálka (1965, s. 215), který uvádí, že pro ochranu vsázky při žihání v řízené atmosféře je vhodné spodní hranu mufle utěsnit *olejovým žlabem, který je chlazený vodou*. Vanu se žlabem by bylo vhodné opatřit bezpečnostním čidlem pro snímání minimální hladiny a teploty doporučeného oleje. Jako optimálnější se jeví chlazení s uzavřeným okruhem. [27]

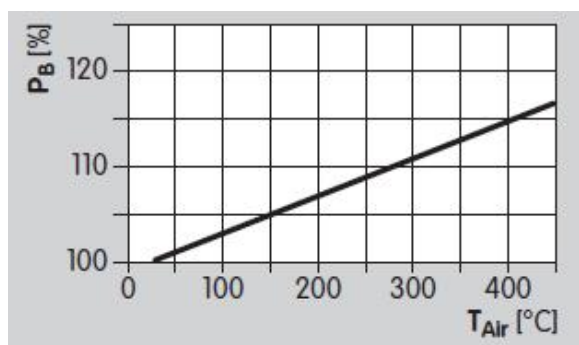
Z konstrukčního hlediska je dalším prvkem, který ovlivňuje poruchovost procesu žihání, je nyní používaný *systém chlazení poklopatových vík*. Je provozován jako otevřený okruh chlazení. To s sebou přináší nutnost často doplňovat chladicí okruh vodou, která se během procesu odpařila. Tím se okruh více sytí kyslíkem a minerálními látkami. Dochází tak k reakci s kovovými částmi okruhu - vznik koroze, zmenšování průřezu průtokových trubek – zhoršení funkce chlazení, poškození vík mufle (vlivem koroze, deformace z vyšších teplot), poškození chladičů. Na obr. 21a,b je ukázka poškozeného víka pece vlivem koroze a stav výtokových trychtýřů u otevřeného okruhu. Navrhovaným *řešením je změna chlazení* z otevřeného okruhu s vodou na uzavřený okruh s vhodnou chladicí kapalinou.



Obrázek 21 – Poškození vlivem koroze z otevřeného okruhu: a) víko pece, b) vtokový trychtýř

*Rekuperace odpadního tepla pro ohřev vzduchu* pro plynové hořáky – další vhodnou konstrukční úpravou, na kterou upozorňuje také Dědek ve své publikaci (1964, s. 41), je využití teploty spalin k předehřevu přiváděného vzduchu do plynových hořáků. Tím lze dosáhnout úspor až 10% ve spotřebě tepla při předehřevu vzduchu na teplotu 250°C. Pece jsou osazeny 3 předsměšovacími hořáky BIC 80 s výkonem 105kW. Dle technické

dokumentace výrobce osazených hořáků lze použít předehřátý vzduch o teplotě až 450°C. Pece mají momentálně systém založený na přívodu vzduchu pro hořáky z venkovního prostoru. Konstrukční zásah je nutné konzultovat s odbornou společností zabývající se optimalizací ohřevu u průmyslových pecí také z důvodu návratnosti úprav. Na obr. 22 je uvedeno navýšení výkonu hořáků při použití předehřátého vzduchu. [28], [29]



Obrázek 22 – Závislost výkonu hořáku  $P_B$  na teplotě přívodního vzduchu  $T_{Air}$  <sup>29</sup>

### 3.2.2 Úpravy žíhací mufle

V bodě 1.4.8 jsem posoudil vhodnost použité žáruvzdorné oceli pro žíhací mufli z hlediska okolní atmosféry, způsobu tepelného zpracování a pevnostních charakteristik. Výsledkem bylo, že zvolená ocel 1.4845 není nejvhodnější volbou pro danou aplikaci, hlavně z důvodu výskytu intermetalické fáze sigma, která snižuje houževnatost oceli a také možného výskytu mezikrystalové koroze při výrobě mufle v oblasti svarů. Dědek ve své publikaci uvádí: „Oceli určené pro práci za teplot 500 až 900°C musí mít takové chemické složení, které zaručuje, že se u nich fáze sigma nevyskytne.“ (1964, s. 35) [28]

*Za přijatelnější materiál pro výrobu žíhací mufle* jsem doporučil žáruvzdornou ocel, s ohledem na chemické, mechanické a fyzikální vlastnosti, dostupnosti v požadovaném formátu a doporučení uvedené v technické literatuře, jakosti 1.4864 (X12NiCrSi35-16) dle ČSN EN 10095. Pro určení základní struktury jsem využil, stejně jako u oceli 1.4845, izotermických řezů dle Obr. 5. Pomocí orientačních empirických vzorců (2), (3) jsem vypočetl ekvivalentní hodnoty  $Cr_{eq} = 21\%$  a  $Ni_{eq} = 45,25\%$  dle chemického složení oceli. Výsledná struktura je ryze austenitická. Při porovnání obou ocelí z hlediska chemického složení má ocel 1.4864 vyšší obsah křemíku, který tvoří v okujích křemičitany (ochranný povlak) a částečně brání mezikrystalové korozi. A také výrazně vyšší obsah niklu, který zapříčiňuje lepší mechanické vlastnosti (nižší tažnost, vyšší mez kluzu a mez pevnosti). Naopak nižší obsah chromu zase snižuje náchylnost oceli ke karbidickému křehnutí. Ocel je

velmi vhodná pro žíhací pece, ve kterých dochází k častým cyklickým změnám teploty. Je velmi pevná a odolná proti teplotním rázům. Je odolná proti absorpci uhlíku a dusíku. [2], [3]

Při pohledu na *optimalizaci tloušťky materiálu žíhací mufle* bylo vycházeno z informací uvedených v publikaci od Dědka, kde uvádí, že víka a vnitřní části poklopových pecí pro žíhání jsou vyráběny ze žáruvzdorné chromniklové oceli tloušťky 3-6mm (1964, s. 38). Další důvodem, proč je možné zmenšit tloušťku materiálu mufle, je použití navržené oceli 1.4864, která disponuje lepšími fyzikálními a mechanickými vlastnostmi a také vlivu snížení teplotního zatížení mufle optimalizací tepelné křivky žíhání. Byla navržena tloušťka materiálu 5mm, která zapříčiní nejen rychlejší ohřev vsazky (s tím související nižší spotřeba zemního plynu), ale také snížení hmotnosti celé mufle o cca 17%.

## 4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

### 4.1 Ekonomické přínosy optimalizací teplotní křivky

#### 4.1.1 Srovnání z hlediska úspor ve spotřebě provozních médií

Souhrnné srovnání jednotlivých teplotních křivek uvedených v bodě 3.1.4 z hlediska celkového času žíhání, spotřebě zemního plynu a spotřebě elektrické energie bylo podkladem pro ekonomické vyhodnocení dosažených úspor na jednom žíhacím cyklu, které je uvedeno v tab. 15 a 16.

Tabulka 15 - Ekonomické srovnání nákladů na cyklus z hlediska spotřeby zemního plynu

Křivka	Čas žíhání sledovaného úseku [hod]	Spotřeba zemního plynu ve sledovaném úseku [m <sup>3</sup> ]	Sazba zemního plynu [Kč/m <sup>3</sup> ]	Náklady za spotřebu zemního plynu ve sledovaném úseku [Kč]
standard	14	207	7,6	1573,2
křivka č.1	14	191		1451,6
křivka č.2	12,5	167		1269,2

Tabulka 16 - Ekonomické srovnání nákladů na cyklus z hlediska spotřeby elektrické energie

Křivka	Čas žíhání sledovaného úseku [hod]	Spotřeba elektrické energie [kWh]	Sazba elektrické energie [Kč/kWh]	Náklady za spotřebu elektrické energie [Kč]
standard	14	55	3,7	203,5
křivka č.1	14	55		203,5
křivka č.2	12,5	50		185

Optimalizací teplotní křivky bylo dosaženo **úspory ve výši 304 Kč/cyklus (1573,20-1269,20) u spotřeby zemního plynu a 18,5 Kč/cyklus (203,50-185) u spotřeby elektrické energie**. Při zachování četnosti žíhání (bez ohledu na snížení celkového času žíhání), která činí 5 cyklů/týden, by bylo dosaženo celkové roční úspory ve spotřebě médií:

$$\dot{U}_{ZP+EL,rok} = \text{úspora cyklus} \cdot \text{počet cyklů za týden} \cdot \text{počet prac. týdnů za rok} \quad (16)$$

$$\dot{U}_{ZP+EL,rok} = (304 + 18,5) \cdot 5 \cdot 50 = \mathbf{80\,625\,Kč}$$

**Celková roční úspora ve spotřebě médií by činila 80 625 Kč/pec, tzn. 161 250 Kč při plném provozu obou pecí v režimu 5 cyklů/týden/pec.**

Další možností vyčíslení úspor je z pohledu snížení nákladů s přepočtem na kg výrobku. Průměrná čistá hmotnost vsázky (pouze jádra, bez pomocného materiálu) je 1800kg. Potom by úspora Kč/kg vypadala následovně:

$$\dot{U}_{ZP+EL,výrobek} = \frac{\text{úspora cyklu}}{\text{průměrná čistá hmotnost vsázky}} \quad [\text{Kč/kg}] \quad (17)$$

$$\dot{U}_{ZP+EL,výrobek} = \frac{322,5}{1800} = \mathbf{0,179 \text{ Kč/kg}}$$

V produktových kalkulacích se žihání podílí na celkové ceně výrobků částkou okolo 3 Kč/kg, tzn., že optimalizací žihacího režimu došlo ke **snížení nákladů na žihání o 6%**.

#### 4.1.2 Srovnání z hlediska navýšení kapacit

Pracovní režim tepelného zpracování v AMT se provádí pouze v pracovní dny (začíná se v neděli noční směnou, končí v pátek směnou odpolední). Časový týdenní fond žihání je tedy 120hod. Průměrná celková doba tepelného zpracování (od založení po vyložení pece) je 17hod. Využitelnost pracovního fondu 5 žihacími cykly za týden =  $(17 \times 5) / 120 = 71\%$ . Číslo je poměrně nízké, je ovlivněno mnoha výrobními faktory, mezi které patří hlavně různorodost výrobního sortimentu a termínové plnění zakázek (blokace pece pro spěšné zakázky).

Optimalizací tepelného zpracování došlo ke zkrácení hlavního času žihání o 1,5hod. Tím vznikla **týdenní časová rezerva 7,5hod** pro každou pec. Při stejné využitelnosti pracovního fondu 71% se dosáhne na výkon 5,5 pece/týden. V případě blokace pouze jedné pece pro „spěšné“ zakázky lze dosáhnout maximálního využití úspory času pro pec druhou, tzn. jedna pec by pracovala v týdenním režimu 6 cyklů. Dosažené navýšení kapacit by bylo:

$$C_{\text{rok}} = \text{průměrná čistá hmotnost vsázky} \cdot \text{počet prac. týdnů za rok} \quad [\text{kg}] \quad (18)$$

$$C_{\text{rok}} = 1800 \cdot 50 = \mathbf{90\,000 \text{ kg}}$$

Optimalizací tepelného zpracování a zefektivnění týdenní vytiženosti jedné pece lze dosáhnout **ročního navýšení kapacit o 90 000 kg**.

Při navýšení ročních kapacit a zachování stejného množství pracovníků na operaci tepelného zpracování dochází k úsporám také na mzdách. Ve výrobcích je tepelné zpracování obsaženo nákladem 3 Kč/kg, 50% z těchto nákladů tvoří mzdy pracovníků. Úspora z hlediska mezd pracovníků při navýšení kapacit by byla:

$$\dot{U}_{C,mzdy} = C_{rok} \cdot \text{kalkulační mzdové náklady na 1kg výrobku [Kč]} \quad (19)$$

$$\dot{U}_{C,mzdy} = 90\,000 \cdot 1,5 = \mathbf{135\,000\,Kč}$$

Při navýšení týdenních kapacit o 1 pec se zvedne roční produkce o **90 t** při mzdových úsporách **135 000 Kč**.

#### CELKOVÉ EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PO OPTIMALIZACE ŽÍHACÍ KŘIVKY

Roční úspory ve spotřebě médií..... 161 250 Kč

Roční mzdové úspory.....135 000 Kč

**CELKEM.....296 250 Kč**

**Roční kapacitní navýšení až..... 90 000 kg**

#### **4.2 Ekonomické přínosy úpravou konstrukce pece a žíhací mufle**

Všechny navrhované konstrukční úpravy žíhacích pecí jsou popsány v bodě 3.2.1. Pouze navrhované opatření častější výměny křemičitého písku vedoucí k menšímu výskytu deformace mufle, lze provést v rámci vlastní režie. Veškeré ostatní úpravy jsou navázány na spolupráci s externími společnostmi. Vyčíslení nákladů, jejich návratnosti a vlivu na životnost žíhacích muflí a samotnou ekonomiku provozu pecí, je věcí dlouhodobého charakteru. Např. využití tepla spalin k přehřevu vzduchu pro plynové hořáky může ušetřit až 10% u teploty 250°C, ale náklady na úpravy pecních prostor mohou převyšovat reálnou návratnost investic.

V bodě 3.2.2 byl rozebrán vhodnější materiál žíhací mufle, kterým je ocel 1.4864, která je ovšem několikanásobně cenově nákladnější, až 3x, oproti nyní používané oceli 1.4845 (hlavně z důvodu vyššího obsahu niklu). Výslednou cenu lze snížit změnou tloušťky materiálu mufle, z původní tloušťky 6mm na 5mm. Pro výrobu mufle je zapotřebí 6 ks tabulí o rozměru 5x1250x2000mm o celkové hmotnosti 600kg, čímž je dosaženo úspory v hmotnosti 120kg oproti verzi z tloušťky 6mm.

I když jsou celkové náklady na pořízení vstupního materiálu pro žíhací mufli 2-3x vyšší, je předpoklad, že se výrazně prodlouží životnost samotné mufle.



## 5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo optimalizovat průběh tepelného zpracování výrobků z orientované křemíkové oceli z hlediska konstrukce pece a teplotní křivky. Při teoretickém rozboru materiálu žíhací mufle bylo zjištěno několik nedostatků, které použitý materiál zásadně ovlivňuje během procesu tepelného zpracování. Je to především vliv vzniku intermetalické fáze sigma, která výrazně snižuje houževnatost žáruvzdorné oceli 1.4845. Dalším důležitým zjištěním bylo, že uvedený materiál se používá převážně pro pece s konstantním teplotním zatížením, což není případ režimu používaného v AMT. Výsledkem bylo doporučení vhodnější žáruvzdorné austenitické oceli bez výskytu nežádoucí fáze sigma a pro pece, které pracují s cyklickým teplotním namáháním. Těmto požadavkům vyhovovala nejvíce niklová slitina 1.4864, která je v porovnání s původně používanou ocelí sice výrazně cenově nákladnější vlivem vyššího obsahu niklu, ale předpokládá se u ní také výrazně vyšší životnost. Pořizovací cenu vstupního materiálu pro výrobu žíhací mufle jsem dokázal snížit vlivem použití slabší tloušťky plechu (tím byla snížena výsledná hmotnost plechu a celkové mufle). Ke snížení tloušťky plechu mufle bylo přistoupeno na základě informací zjištěných z odborné literatury a při porovnání mechanických a fyzikálních vlastností jednotlivých druhů oceli, a také snížením teplotního zatížení pece úpravou křivky tepelného zpracování.

Rozborem a doporučením v odborné literatuře byly odzkoušeny a porovnány tři průběhy tepelných křivek žíhání. Po ověření vlivu na elektromagnetické vlastnosti byla vybrána křivka č. 2, kterou bylo docíleno snížení celkového času žíhání o 1,5 hod, čímž došlo k výrazným časovým a finančním úsporám. Ekonomika úspor byla vyčíslena na částku dosahující 300 000 Kč za rok při provozu obou šachtových pecí. Nemalou přidanou hodnotou je také navýšení kapacity pecí o 90t za rok. Číslo je nutné brát jako orientační, jelikož přesná spotřeba médií je závislá na velikosti vsázky a způsobu řízení pracovního postupu na operaci tepelného zpracování (max. využití časového fondu pracovní doby).

V diplomové práci jsou uvedena také doporučení z pohledu konstrukčních úprav pecí, která by měla společnosti přinést další finanční úspory. Změnou způsobu uložení žíhací mufle z původního provedení do křemičitého písku za usazení do žlabu s chlazeným olejem, za účelem kompenzace délkového prodloužení mufle a vzduchotěsného uzavření ochranné atmosféry, lze předpokládat přínos spočívající v lepším pohlcení deformací a menší poruchovosti pece. V případě jiných navrhovaných úprav, příkladně při využití

spalinového tepla k předehřevu vzduchu pro plynové hořáky, může být dosaženo úspor až 10% ve spotřebě zemního plynu.

Doporučením pro společnost AMT je prodiskutovat veškeré navrhované konstrukční úpravy pece s externími společnostmi pro vyčíslení návratnosti investic. Cíl práce byl splněn, dosáhlo se časových a finančních úspor v režimu tepelného zpracování výrobků z křemíkové oceli, optimalizací teplotní křivky. Navrhované změny materiálu žíhací mufle, konstrukční změny mufle a pece, jsou vázané na delší časový úsek, který je nutné vyhodnocovat průběžně při realizaci řešených částí.

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Jiřímu Hrubému, CSc. za jeho cenné rady a za čas, který mi věnoval při tvorbě práce. Velkou oporou mi byla rodina, převážně manželka Hanka a věrný pes Murphy, kterým patří také velké poděkování.

Bc. Lukáš Šafařík

## LITERATURA

- [1] POSPÍŠIL, Rudolf. *Antikoroze a žáruvzdorné oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956.
- [2] MARSHALL, P. *Austenitic stainless steels: microstructure and mechanical properties*. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1984. ISBN 0-85334-277-6.
- [3] KOSMAČ, Alenka. *Stainless steels at high temperatures*. Brussels: Euro Inox, 2012. Materials and applications series, 18. ISBN 978-2-87997-064-6.
- [4] SHIRZADI, A. *Structural alloys for power plants: operational challenges and high-temperature materials*. Waltham, MA: Woodhead Pub., 2014. ISBN 9780857092380.
- [5] BARTÁK, Jiří. *Svařování kovů v praxi: materiály, výpočty, technologie, požadavky na jakost, bezpečnost práce*. Praha: Dashöfer, 2008. ISSN 1803-2834.
- [6] JAREŠ, Vojtěch. *Metalografie ocele*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1960. Studie a prameny.
- [7] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [8] PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK, Přemysl RYŠ a Mojmir CENEK. *Nauka o materiálu*. I, Nauka o kovech. 2. rozš. a zcela přeprac. vyd. Praha: Academia, 1966. (s.147)
- [9] ČSN EN 10095. *Oceli a niklové slitiny žáruvzdorné*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [10] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [11] TUMAŃSKI, Sławomir. *Handbook of magnetic measurements*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2011. ISBN 9781439829516.
- [12] DAVIS, J. R. *Alloying: understanding the basics*. Materials Park, OH: ASM International, 2001. ISBN 978-0-87170-744-4.
- [13] DRÁPAL, Stanislav. *Úvod do fyzikální metalurgie elektrotechnických materiálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1973.
- [14] COEY, J. M. D. *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 0521816149.

- [15] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály: [učební text]*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [16] BOSSCHE, Alex van den a Vencislav VALCHEV. *Inductors and transformers for power electronics*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005. ISBN 1-57444-679-7.
- [17] ČSN EN 10107. *Pásky a plechy pro elektrotechniku anizotropní dodávané v tepelně zpracovaném stavu*. Praha: Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [18] ATI, Technical Data Sheet [online]. *Grain-Oriented Electrical Steel*. ATI, 2012. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.spacematdb.com/spacemat/manudatasheets/crgo.pdf>
- [19] ARCELORMITTAL OSTRAVA. *Hot rolled wide strip and cold rolled full hard strip from silicon steel intended for production of cold rolled grain oriented electrical sheets and strips*. Technical Delivery Condition. Interní předpis. Ostrava. November 2015.
- [20] MACHEK, Václav. *Tenké ocelové pásky a plechy válcované zastudena*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [21] KREMER, Rudolf a Karel OBROUČKA. *Ohřev kovů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1974.
- [22] THYSSENKRUPP-STEEL [online]. *Grain oriented electrical steel – power core*. © 2017. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://thyssenkrupp-steel.com/en/electricalsteel-product-range.pdf>
- [23] AK STEEL [online]. *Grain oriented electrical steels – Lite carlite and mill anneal*. © 2018. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.aksteel.com/sites/default/files/2018-12/lite-carlite-and-mill-anneal.pdf>
- [24] POSCO [online]. *Electrical steel*. Copyright © 2014 by POSCO. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: [http://www.posco.com/homepage/docs/eng5/dn/company/product/e\\_electrical\\_pdf\\_2011.pdf](http://www.posco.com/homepage/docs/eng5/dn/company/product/e_electrical_pdf_2011.pdf)
- [25] BAOSTEEL [online]. *Grain-Oriented Electrical Steel*. Copyright © 1985-2013. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://esales.baosteel.com/portal/download/manual/GO-ElectricalSteel.pdf>
- [26] *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review): Core loss distribution measurement of electrical steel sheets using a thermo graphic camera*. SHIMOJI, Hiroyasu et al, R.87 (No. 9b/2011), 2011, 65. ISSN 0033-2097.

- [27] ŠMÁLEK, Josef, Zdeněk ŠTĚTKA a Ivan ŠTELOVSKÝ. *Průmyslové pece ve strojírenství*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
- [28] DĚDEK, Vladimír. *Tepelné zpracování ocelových pásů válcovaných za studena*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [29] *Návod k provozu: Hořák pro plyny BIC, BICA* [online]. © 2008–2011 Elster GmbH. [cit.2019-26-04]. Dostupné z: <https://docuthek.kromschroeder.com/documents/download.php?lang=de&doc=31969>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 - Řez šachtovou plynovou pecí</i> .....	11
<i>Obrázek 2 – Zapisovač BrainChild VR-06</i> .....	12
<i>Obrázek 3 – Ukázka poškození částí pece</i> .....	14
<i>Obrázek 4 – Opal žáruvzdorných ocelí a Ni-Cr oceli při teplotě 1200°C při různém teplotním zatížení</i> <sup>1</sup> .....	15
<i>Obrázek 5 – Izotermické řezy při 650°C systému Cr-Fe-Ni</i> <sup>2</sup> .....	20
<i>Obrázek 6 – Ukázka výrobků AMT</i> .....	23
<i>Obrázek 7 – Hysterezní smyčka feromagnetika s vyznačením domén</i> <sup>14</sup> .....	25
<i>Obrázek 8 – Koeficienty magnetostrickce <math>\lambda</math> pro různé slitiny Fe-Ni v závislosti na <math>H</math></i> <sup>15</sup> .....	26
<i>Obrázek 9 – Složení průměrné roční produkce magneticky měkkých materiálů</i> <sup>11</sup> .....	26
<i>Obrázek 10 – SiFe fázový diagram</i> <sup>14</sup> .....	27
<i>Obrázek 11 – Gossova struktura křemíkové orientované oceli</i> <sup>14</sup> .....	28
<i>Obrázek 12 – Struktura domén v 3% krystalů FeSi</i> <sup>11</sup> .....	29
<i>Obrázek 13 – Navíjecí stroje v AMT</i> .....	31
<i>Obrázek 14 – Připravené žíhací čočky pro založení do pece</i> .....	33
<i>Obrázek 15 – Typická křivka tepelného zpracování získaná ze zapisovače Brainchild</i> .....	34
<i>Obrázek 16 – Průběh tepelného zpracování – standardní křivka</i> .....	37
<i>Obrázek 17 – Připravené žíhací čočky pro založení do pece pro křivku č.1</i> .....	42
<i>Obrázek 18 – Průběh tepelného zpracování – křivka č.1</i> .....	43
<i>Obrázek 19 – Naložené žíhací čočky pro křivku č.2</i> .....	45
<i>Obrázek 20 – Průběh tepelného zpracování – křivka č.2</i> .....	46
<i>Obrázek 21 – Poškození vlivem koroze z otevřeného okruhu</i> .....	50
<i>Obrázek 22 – Závislost výkonu hořáku <math>P_B</math> na teplotě přívodního vzduchu <math>T_{Air}</math></i> <sup>29</sup> .....	51

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 - Chemické složení oceli 1.4845<sup>9</sup></i> .....	19
<i>Tabulka 2 - Vybrané mechanické vlastnosti oceli 1.4845<sup>9</sup></i> .....	20
<i>Tabulka 3 - Informativní průměrné hodnoty meze tečení pro prodloužení 1% při zvýšených teplotách<sup>9</sup></i> .....	20
<i>Tabulka 4 - Informativní průměrné hodnoty meze pevnosti při tečení při zvýšených teplotách<sup>9</sup></i> .....	20
<i>Tabulka 5 - Informativní údaje o fyzikálních vlastnostech oceli<sup>9</sup></i> .....	21
<i>Tabulka 6 - Vlastnosti magneticky měkkých materiálů pro nízkofrekvenční aplikace<sup>14</sup></i> .....	27
<i>Tabulka 7 - Typické vlastnosti CRGO: a) mechanické, b) fyzikální<sup>18</sup></i> .....	30
<i>Tabulka 8 - Chemické složení CRGO<sup>19</sup></i> .....	30
<i>Tabulka 9 - Hodnotící kritéria u standardní teplotní křivky</i> .....	38
<i>Tabulka 10 - Hodnotící kritéria u navržené křivky č.1</i> .....	43
<i>Tabulka 11 - Hodnotící kritéria u navržené křivky č.2</i> .....	46
<i>Tabulka 12 - Srovnání celkového času žhání, spotřeb médií a max. dosažené teploty</i> .....	48
<i>Tabulka 13 – Srovnání z hlediska elektromagnetických veličin</i> .....	48
<i>Tabulka 14 - Srovnání dle vypočtených hodnot teplot a časů</i> .....	49
<i>Tabulka 15 - Ekonomické srovnání nákladů na cyklus z hlediska spotřeby zemního plynu</i>	53
<i>Tabulka 16 - Ekonomické srovnání nákladů na cyklus z hlediska spotřeby elektrické energie</i> .....	53

## SEZNAM PŘÍLOH

<i>Příloha A - Inspekční certifikát magnetických vlastností jader u křivky standard</i> .....	65
<i>Příloha B - Inspekční certifikát magnetických vlastností jader u křivky č.1</i> .....	68
<i>Příloha C - Inspekční certifikát magnetických vlastností jader u křivky č.2</i> .....	71



# PŘÍLOHY

## Příloha A - Inspekční certifikát magnetických vlastností jader u křivky standard

			INSPECTION OF MAGNETIC TESTING - 820°C/3hod						
ArcelorMittal Technotron s.r.o.					Inspection no. _type				
738 01 Frýdek-Místek					Order no.:				
					Contract no.:				
					Customer order no.:				
Core type	130-85-40				Internal no.:				
Grade:	M105-30P/SU				Measured by:		11.4.2019		
Quantity:	50								
Customer									
			Measured values of frekvency 50 Hz						
No.	H ef [A/m]	H max [A/m]	B max [T]	Core loss [W]	Spec. loss [W/kg]	App. power [VA]	Perm.	I rms [A]	U rms [V]
1	3	4,3487	0,1201	0,015852	0,007102	0,023547	21965	0,0453	0,5102
1	23,6081	38,4003	1,7	2,091162	0,936901	2,670271	35230	0,3622	7,3681
1	30	55,6864	1,7668	2,479338	1,110815	3,563115	25249	0,4457	7,737
2	3	4,2161	0,1266	0,016726	0,007494	0,024944	23846	0,0424	0,5378
2	23,2423	36,8248	1,7	2,083578	0,933503	2,625502	36743	0,3538	7,3586
2	30	55,441	1,7746	2,504677	1,122167	3,576367	25480	0,4564	7,7655
3	3	4,2573	0,1508	0,018398	0,008243	0,02944	28179	0,0456	0,6391
3	26,0387	48,2872	1,7	2,073754	0,929101	2,964733	28050	0,387	7,4166
3	30	60,4977	1,7414	2,281063	1,021982	3,514851	22909	0,4541	7,6321
4	3	4,2018	0,1187	0,015209	0,006814	0,023254	22468	0,0441	0,5044
4	24,3386	39,8338	1,7	2,126553	0,952757	2,753753	33966	0,3702	7,3702
4	30	55,5824	1,7662	2,479883	1,111059	3,554911	25313	0,4514	7,7187
5	3	4,2203	0,1169	0,01435	0,006429	0,022856	22028	0,0451	0,4958
5	24,4392	39,8766	1,7	2,147308	0,962056	2,75669	33933	0,3723	7,3478
5	30	55,3351	1,7533	2,466251	1,104951	3,528497	25218	0,4592	7,6617
6	3	4,3425	0,1462	0,018135	0,008125	0,028608	26774	0,0401	0,6196
6	20,7639	31,104	1,7	1,939559	0,868978	2,342368	43515	0,3158	7,3483
6	30	56,0995	1,8022	2,55155	1,143168	3,644681	25575	0,4464	7,914
7	3	4,2453	0,1398	0,01619	0,007254	0,027325	26190	0,044	0,5919
7	22,4096	36,5259	1,7	1,961859	0,878969	2,528701	37038	0,3438	7,3507
7	30	59,2856	1,7769	2,376405	1,064697	3,585712	23854	0,4595	7,786
8	3	4,2738	0,1399	0,016837	0,007543	0,027309	26042	0,0456	0,5928
8	22,836	37,356	1,7	2,026094	0,907748	2,583459	36217	0,3482	7,3695
8	30	57,8826	1,7683	2,435891	1,091349	3,577779	24314	0,4554	7,7688
9	3	4,2443	0,151	0,018265	0,008183	0,029517	28296	0,0446	0,6401
9	20,2067	30,5012	1,7	1,875125	0,84011	2,276288	44367	0,3087	7,3381
9	30	58,3899	1,8057	2,482857	1,112391	3,652072	24636	0,4528	7,9297
10	3	4,2324	0,1509	0,018401	0,008244	0,029511	28364	0,0453	0,6401
10	20,8323	31,9142	1,7	1,902296	0,852283	2,345854	42430	0,3149	7,3346
10	30	58,8374	1,8025	2,461311	1,102738	3,637604	24401	0,4512	7,8982
11	3	4,2845	0,1468	0,018355	0,008224	0,028708	27257	0,0449	0,6231
11	21,1628	31,9831	1,7	1,973247	0,884071	2,392061	42309	0,3209	7,363
11	30	55,2693	1,8043	2,585752	1,158491	3,650201	25992	0,457	7,9259
12	3	4,2252	0,1532	0,018986	0,008506	0,030006	28837	0,0443	0,6497
12	23,0311	38,5765	1,7	1,971579	0,883324	2,601014	35069	0,3435	7,3568
12	30	59,5519	1,7704	2,334945	1,046122	3,568168	23675	0,4557	7,7475
13	3	4,2414	0,1482	0,018132	0,008124	0,02901	27787	0,0445	0,6292
13	25,3534	44,9739	1,7	2,052476	0,919568	2,873404	30092	0,374	7,3826
13	30	58,387	1,7501	2,293941	1,027751	3,520556	23873	0,4525	7,6443
14	3	4,2343	0,1509	0,018448	0,008265	0,029523	28349	0,0429	0,6407
14	20,5582	31,0865	1,7	1,899192	0,850893	2,320474	43530	0,3149	7,3527
14	30	57,6337	1,8042	2,491072	1,116072	3,649543	24922	0,4517	7,9242

*pokračování Příloha A*

15	30	54,0471	1,7436	2,460079	1,102186	3,505478	25679	0,4584	7,6116
15	25,7092	42,6802	1,7	2,207259	0,988915	2,907792	31713	0,3874	7,3675
15	3	4,2426	0,1209	0,015443	0,006919	0,023696	22670	0,0426	0,5138
16	30	58,375	1,7933	2,421977	1,085115	3,62127	24454	0,4577	7,8632
16	21,1674	33,352	1,7	1,901964	0,852134	2,388171	40589	0,3213	7,3492
16	3	4,2279	0,1526	0,018645	0,008353	0,029809	28709	0,0444	0,6463
17	30	55,988	1,7809	2,50873	1,123983	3,601187	25322	0,4536	7,8194
17	22,8774	35,977	1,7	2,065438	0,925375	2,588975	37607	0,3446	7,3719
17	3	4,2896	0,1229	0,016267	0,007288	0,024099	22779	0,045	0,5225
18	40,3026	88,4294	1,845	2,957758	1,32516	5,104005	16602	0,5779	8,2495
18	30	59,254	1,8106	2,509392	1,12428	3,667696	24358	0,4429	7,9629
18	3	4,2518	0,1456	0,017678	0,00792	0,028506	27235	0,044	0,618
19	30	56,3739	1,7754	2,416834	1,082811	3,586193	25074	0,4542	7,7868
19	22,4225	36,2035	1,7	1,974991	0,884853	2,532806	37388	0,3357	7,3579
19	3	4,2222	0,1465	0,017647	0,007906	0,028686	27595	0,0447	0,622
20	38,997	86,3485	1,7	2,608651	1,16875	4,699025	15695	0,6029	7,8506
20	30	58,8098	1,7697	2,339601	1,048208	3,567111	23960	0,4554	7,7455
20	3	4,2304	0,1506	0,018292	0,008195	0,029406	28326	0,0456	0,6383
21	30	55,5711	1,7772	2,510111	1,124602	3,584071	25457	0,4527	7,7822
21	22,6828	35,3361	1,7	2,05238	0,919525	2,556268	38290	0,3426	7,341
21	3	4,2214	0,1237	0,016324	0,007314	0,024234	23318	0,046	0,5262
22	30	59,765	1,7569	2,289906	1,025944	3,543736	23415	0,4506	7,6947
22	23,9409	41,4864	1,7	1,993715	0,893242	2,709926	32628	0,3653	7,3733
22	3	4,2212	0,1559	0,019408	0,008695	0,030485	29387	0,0436	0,6613
23	30	58,5652	1,7845	2,398319	1,074516	3,599353	24251	0,4588	7,8156
23	21,8928	34,7494	1,7	1,935844	0,867314	2,467164	38940	0,3348	7,3408
23	3	4,225	0,1443	0,016641	0,007456	0,028198	27181	0,0445	0,6113
24	30	55,1579	1,7712	2,476645	1,109608	3,571657	25554	0,4532	7,7555
24	23,5046	37,5886	1,7	2,078176	0,931082	2,656658	36003	0,3588	7,3624
24	3	4,2646	0,1186	0,015417	0,006907	0,02325	22127	0,0426	0,5044
25	30	58,6377	1,7558	2,309313	1,034639	3,538602	23837	0,4581	7,6837
25	24,5666	43,6734	1,7	2,023472	0,906573	2,784356	30980	0,3734	7,3829
25	3	4,2257	0,1534	0,01904	0,00853	0,030026	28874	0,045	0,6512
26	30	59,5994	1,7804	2,374007	1,063623	3,604818	23794	0,4563	7,8272
26	22,242	35,8185	1,7	1,954389	0,875622	2,513418	37782	0,3387	7,3608
26	3	4,2534	0,1433	0,0168	0,007527	0,028042	26799	0,0451	0,608
27	30	55,7797	1,7694	2,46962	1,106461	3,571756	25251	0,4517	7,7556
27	23,7994	38,6066	1,7	2,096227	0,93917	2,699134	35054	0,3621	7,3874
27	3	4,2079	0,1184	0,015538	0,006962	0,023222	22379	0,0447	0,5036
28	30	59,3261	1,774	2,334538	1,04594	3,573156	23805	0,4419	7,7586
28	23,1411	38,5644	1,7	1,974723	0,884732	2,611293	35080	0,3552	7,3508
28	3	4,2247	0,1466	0,017128	0,007674	0,028656	27609	0,0447	0,6213
29	30	57,8968	1,792	2,461351	1,102756	3,610104	24655	0,454	7,8387
29	21,6548	33,6467	1,7	1,958733	0,877569	2,437491	40219	0,3312	7,3323
29	3	4,2388	0,1465	0,017852	0,007998	0,028655	27501	0,0429	0,6212
30	30	56,3891	1,7909	2,491512	1,116269	3,613571	25278	0,4564	7,8464
30	21,6457	33,977	1,7	1,962149	0,879099	2,442567	39837	0,3265	7,3506
30	3	4,2391	0,1435	0,017398	0,007795	0,028124	26904	0,0432	0,6077
31	30	58,3366	1,7946	2,420243	1,084338	3,641023	24500	0,443	7,9057
31	20,4458	31,5563	1,7	1,866917	0,836432	2,308863	42888	0,3085	7,356
31	3	4,2387	0,1533	0,018621	0,008343	0,029943	28769	0,045	0,65
32	30	58,2541	1,8094	2,483996	1,112901	3,658923	24746	0,4545	7,9444
32	19,9807	29,4529	1,7	1,87159	0,838526	2,24897	45932	0,3042	7,3322
32	3	4,2499	0,1512	0,018644	0,008353	0,029566	28319	0,0444	0,642
33	33,4888	64,7928	1,7	2,299195	1,030105	3,815754	20887	0,5055	7,422
33	30	54,9533	1,6614	2,134775	0,95644	3,326508	24064	0,4526	7,223
33	3	4,264	0,1338	0,015809	0,007083	0,026136	24975	0,0438	0,5673
34	30	59,4559	1,7665	2,317615	1,038358	3,56467	23655	0,4547	7,74
34	22,6818	38,0241	1,7	1,942371	0,870238	2,563307	35578	0,3481	7,3618
34	3	4,2284	0,1533	0,018477	0,008278	0,029968	28839	0,0455	0,6502

*pokračování Příloha A*

35	30	58,2856	1,7853	2,420412	1,084414	3,601907	24378	0,4432	7,8212
35	21,1985	33,2025	1,7	1,920129	0,860273	2,387708	40760	0,3233	7,337
35	3	4,2651	0,1466	0,017876	0,008009	0,028712	27346	0,0425	0,6227
36	30	55,1371	1,7428	2,417872	1,083276	3,506135	25186	0,4482	7,6126
36	26,1084	43,8662	1,7	2,190089	0,981223	2,959258	30841	0,393	7,3835
36	3	4,2607	0,1252	0,015837	0,007095	0,024547	23381	0,0446	0,5322
37	30	57,9396	1,8121	2,507195	1,123295	3,660827	24909	0,4505	7,949
37	19,6993	29,108	1,7	1,853167	0,830272	2,213169	46492	0,2992	7,3182
37	3	4,2478	0,1506	0,018462	0,008272	0,029465	28199	0,0427	0,6393
38	30	58,5593	1,8015	2,468527	1,105971	3,640291	24494	0,4561	7,9043
38	20,5087	30,9584	1,7	1,897316	0,850052	2,3091	43715	0,3121	7,3341
38	3	4,2578	0,1471	0,017831	0,007989	0,028732	27486	0,0427	0,6231
39	30	58,9857	1,7996	2,465594	1,104657	3,644884	24279	0,4578	7,9144
39	20,4753	31,3377	1,7	1,892185	0,847753	2,309511	43218	0,3072	7,3471
39	3	4,2525	0,1487	0,01809	0,008105	0,029104	27812	0,0436	0,631
40	30	57,4862	1,7999	2,482327	1,112154	3,6385	24932	0,4537	7,9004
40	20,4233	31,1711	1,7	1,886796	0,845339	2,299608	43416	0,3092	7,3346
40	3	4,2376	0,148	0,017744	0,00795	0,028902	27795	0,0452	0,6273
41	30	58,0371	1,7995	2,46616	1,104911	3,642844	24683	0,4519	7,9099
41	20,6045	31,4392	1,7	1,895213	0,84911	2,322344	43034	0,3113	7,3422
41	3	4,2319	0,1508	0,018296	0,008197	0,029482	28350	0,0427	0,64
42	30	58,6753	1,7497	2,272978	1,018359	3,520552	23744	0,4539	7,6442
42	25,1928	44,2952	1,7	2,037128	0,912692	2,849173	30548	0,3856	7,3672
42	3	4,2359	0,1521	0,01865	0,008356	0,029834	28543	0,0442	0,6455
43	30	58,4881	1,7843	2,383588	1,067916	3,598825	24276	0,4605	7,8145
43	21,8556	34,7086	1,7	1,929364	0,86441	2,460941	39023	0,3312	7,3343
43	3	4,2386	0,1442	0,016552	0,007416	0,028241	27063	0,045	0,6123
44	30	60,7067	1,8061	2,381261	1,066873	3,643989	23685	0,4561	7,9125
44	20,3578	31,4806	1,7	1,852119	0,829803	2,291286	42974	0,3125	7,3318
44	3	4,2368	0,1594	0,019857	0,008897	0,03118	29922	0,0447	0,6751
45	30	59,951	1,7741	2,311145	1,035459	3,581802	23554	0,4466	7,7775
45	22,4518	37,4624	1,7	1,929435	0,864442	2,535245	36121	0,3358	7,3557
45	3	4,226	0,1548	0,018831	0,008437	0,030314	29149	0,0454	0,6576
46	30	57,6503	1,8045	2,509595	1,124371	3,651184	24924	0,452	7,9279
46	20,3804	30,0927	1,7	1,906244	0,854052	2,296484	44985	0,3107	7,34
46	3	4,2531	0,1472	0,018032	0,008079	0,028871	27513	0,0422	0,6246
47	30	57,4079	1,8001	2,466623	1,105118	3,640694	24955	0,4473	7,9054
47	20,3269	31,1466	1,7	1,871043	0,838281	2,290635	43435	0,3118	7,3408
47	3	4,2538	0,1491	0,018115	0,008116	0,02915	27888	0,0443	0,6329
48	30	56,5259	1,7725	2,474517	1,108655	3,573793	24972	0,4498	7,7599
48	23,0387	36,421	1,7	2,064606	0,925003	2,597899	37147	0,349	7,3453
48	3	4,208	0,1188	0,01578	0,00707	0,023309	22448	0,0433	0,505
49	30	59,3533	1,7771	2,35074	1,053199	3,58928	23830	0,4424	7,7937
49	22,6112	37,2555	1,7	1,955122	0,875951	2,553431	36319	0,3441	7,3563
49	3	4,2509	0,1433	0,016458	0,007374	0,028002	26824	0,0454	0,6078
50	30	58,0112	1,7874	2,404507	1,077288	3,597121	24529	0,4516	7,8104
50	22,258	35,7375	1,7	1,950598	0,873924	2,508154	37855	0,3415	7,3406
50	3	4,2607	0,1414	0,01614	0,007231	0,027676	26407	0,0456	0,6005

*Príloha B - Inspekční certifikát magnetických vlastností jader u křivky č.1*

			INSPECTION OF MAGNETIC TESTING - 810°C/2hod						
ArcelorMittal Technotron s.r.o.					Inspection no. _type				
738 01 Frýdek-Místek					Order no.:				
					Contract no.:				
					Customer order no.:				
Core type	130-85-40				Internal no.:				
Grade:	M105-30P/SU				Measured by:		12.4.2019		
Quantity:	50								
Customer									
			Measured values of frekvency 50 Hz						
No.	H ef [A/m]	H max [A/m]	B max [T]	Core loss [W]	Spec. loss [W/kg]	App. power [VA]	Perm.	I rms [A]	U rms [V]
1	30	58,9369	1,8025	2,423599	1,085842	3,633806	24347	0,4587	7,8904
1	20,2219	30,7044	1,7	1,852772	0,830095	2,27028	44069	0,306	7,3131
1	3	4,2987	0,1505	0,018076	0,008099	0,029308	27857	0,0429	0,6362
2	30	55,7037	1,7721	2,484603	1,113173	3,562788	25321	0,4595	7,7362
2	23,3674	37,0471	1,7	2,076963	0,930539	2,634754	36520	0,3459	7,3449
2	3	4,2346	0,1237	0,016091	0,007209	0,024258	23235	0,0459	0,5265
3	30	59,7623	1,7802	2,336207	1,046688	3,583212	23722	0,4492	7,7803
3	22,4557	36,6351	1,7	1,938809	0,868642	2,529649	36943	0,3383	7,3379
3	3	4,2655	0,1442	0,016642	0,007456	0,028246	26881	0,0449	0,6125
4	30	59,7162	1,7778	2,335264	1,046265	3,571808	23703	0,4558	7,7557
4	23,136	38,7345	1,7	1,968162	0,881793	2,608105	34936	0,3529	7,3432
4	3	4,2449	0,1452	0,016789	0,007522	0,028344	27218	0,0438	0,6154
5	30	59,7704	1,7448	2,258724	1,011973	3,506892	23239	0,4493	7,6143
5	25,128	45,1339	1,7	2,024328	0,906957	2,838076	29979	0,3804	7,3573
5	3	4,3019	0,1503	0,01825	0,008177	0,029335	27795	0,0434	0,6367
6	30	55,4962	1,7718	2,488343	1,114849	3,563585	25411	0,4558	7,738
6	23,524	37,5154	1,7	2,081692	0,932658	2,652072	36077	0,3569	7,3437
6	3	4,2586	0,1222	0,015573	0,006977	0,023894	22819	0,0433	0,5183
7	30	58,9839	1,7664	2,355117	1,05516	3,560634	23855	0,4482	7,7312
7	22,7662	38,1703	1,7	1,962005	0,879035	2,571781	35470	0,3398	7,3581
7	3	4,2513	0,1485	0,01791	0,008024	0,028971	27783	0,0454	0,6283
8	30	58,4195	1,7774	2,373209	1,063266	3,582773	24219	0,4421	7,7794
8	21,7538	35,1128	1,7	1,917651	0,859163	2,452544	38555	0,3313	7,3438
8	3	4,2361	0,1541	0,018987	0,008507	0,030045	28953	0,0457	0,6519
9	30	55,3983	1,7595	2,457534	1,101046	3,528102	25294	0,4446	7,6603
9	24,3715	39,6954	1,7	2,117812	0,948841	2,745759	34087	0,3676	7,3388
9	3	4,1972	0,1174	0,014527	0,006508	0,022995	22249	0,0427	0,4991
10	30	57,693	1,8032	2,474559	1,108673	3,639626	24878	0,4596	7,903
10	19,9841	29,8271	1,7	1,862332	0,834378	2,245932	45399	0,3046	7,3205
10	3	4,2512	0,1472	0,017864	0,008004	0,028728	27555	0,0452	0,6231
11	30	55,8752	1,7791	2,473222	1,108074	3,574634	25351	0,4522	7,7615
11	22,6699	36,2679	1,7	2,012102	0,901479	2,551894	37321	0,3436	7,3327
11	3	4,2432	0,1385	0,01745	0,007818	0,027172	25938	0,0441	0,5876
12	30	59,4472	1,8051	2,448463	1,096982	3,649277	24172	0,4589	7,9239
12	19,9693	29,6812	1,7	1,857202	0,83208	2,245696	45582	0,3032	7,3257
12	3	4,2516	0,1472	0,017909	0,008024	0,028848	27549	0,0452	0,6256
13	30	56,5451	1,7154	2,266911	1,015641	3,440346	24152	0,4562	7,4698
13	28,383	52,0021	1,7	2,18265	0,97789	3,218968	26018	0,4346	7,3878
13	3	4,2501	0,1444	0,017359	0,007777	0,028152	27035	0,046	0,6112
14	30	59,1222	1,7765	2,353091	1,054252	3,581296	23927	0,4567	7,776
14	21,8162	35,8109	1,7	1,911781	0,856533	2,459623	37790	0,3333	7,3441
14	3	4,2444	0,1546	0,019082	0,008549	0,030162	28989	0,0449	0,6548

*pokračování Příloha B*

15	30	55,0084	1,7519	2,470038	1,106648	3,528301	25347	0,4591	7,6613
15	24,9423	40,9769	1,7	2,160071	0,967774	2,823659	33028	0,3811	7,3743
15	3	4,2451	0,1169	0,014502	0,006497	0,022958	21920	0,0458	0,4983
16	30	56,063	1,7651	2,451404	1,098299	3,553134	25054	0,4429	7,7153
16	23,8682	38,7923	1,7	2,082024	0,932806	2,69476	34877	0,3659	7,3546
16	3	4,1864	0,122	0,015692	0,00703	0,023868	23191	0,0445	0,5179
17	30	59,0844	1,7732	2,336372	1,046762	3,582053	23894	0,4503	7,7778
17	21,839	35,7595	1,7	1,90622	0,854041	2,46366	37842	0,3334	7,3484
17	3	4,2135	0,1562	0,019236	0,008618	0,030555	29494	0,0431	0,6625
18	30	58,4757	1,7683	2,347361	1,051685	3,565691	24076	0,4449	7,7424
18	22,9498	38,1942	1,7	1,967897	0,881674	2,593629	35441	0,3483	7,3616
18	3	4,2189	0,1525	0,01895	0,00849	0,029795	28759	0,0436	0,6465
19	30	57,9358	1,7964	2,444954	1,09541	3,621998	24679	0,4466	7,8647
19	20,6568	31,6242	1,7	1,893531	0,848356	2,322811	42809	0,3137	7,3245
19	3	4,2933	0,146	0,017752	0,007953	0,028587	27040	0,0451	0,6197
20	30	59,0974	1,777	2,352734	1,054092	3,582122	23953	0,4471	7,7775
20	22,455	36,4113	1,7	1,948738	0,873091	2,531533	37191	0,3366	7,3433
20	3	4,3278	0,1465	0,017155	0,007686	0,028533	26935	0,0458	0,6194
21	30	59,491	1,7915	2,365982	1,060028	3,611726	23982	0,4514	7,8423
21	20,8339	33,0789	1,7	1,865867	0,835962	2,343946	40900	0,3182	7,3288
21	3	4,2739	0,157	0,01931	0,008651	0,030711	29199	0,0418	0,6646
22	30	58,9346	1,7742	2,337338	1,047195	3,575952	23963	0,4462	7,7647
22	22,6818	37,5173	1,7	1,950442	0,873854	2,557052	36067	0,3467	7,3437
22	3	4,2638	0,1426	0,016335	0,007318	0,027808	26604	0,0458	0,6035
23	30	56,7893	1,7858	2,475769	1,109216	3,601994	25027	0,4571	7,8214
23	21,4352	33,081	1,7	1,956392	0,87652	2,410423	40894	0,3262	7,3253
23	3	4,2508	0,1437	0,017761	0,007957	0,0282	26887	0,0437	0,6101
24	30	60,1266	1,779	2,329719	1,043781	3,587313	23563	0,4468	7,7891
24	21,0665	33,5968	1,7	1,872033	0,838724	2,366972	40267	0,3161	7,3192
24	3	4,3222	0,1592	0,019661	0,008809	0,031099	29298	0,0457	0,6747
25	30	59,421	1,7899	2,38379	1,068006	3,613346	23979	0,4399	7,8458
25	20,8784	32,6732	1,7	1,877219	0,841048	2,352741	41405	0,3204	7,3407
25	3	4,2474	0,1576	0,019342	0,008666	0,030798	29513	0,0445	0,6679
26	30	56,0358	1,7707	2,46572	1,104713	3,560095	25151	0,4463	7,7303
26	23,5527	37,9137	1,7	2,074265	0,92933	2,654427	35684	0,3541	7,3415
26	3	4,2182	0,1201	0,01553	0,006958	0,02356	22639	0,0439	0,5105
27	30	55,8007	1,7616	2,452357	1,098726	3,543971	25126	0,4588	7,6954
27	24,4285	40,3249	1,7	2,109272	0,945014	2,761098	33551	0,3732	7,3628
27	3	4,2163	0,119	0,015233	0,006825	0,023329	22444	0,0419	0,5051
28	30	55,279	1,7753	2,531759	1,1343	3,575879	25574	0,4544	7,7644
28	23,1612	36,4997	1,7	2,09388	0,938119	2,613843	37073	0,3536	7,3515
28	3	4,223	0,1189	0,015338	0,006872	0,023293	22391	0,0444	0,5048
29	30	59,8305	1,7787	2,359552	1,057147	3,593088	23665	0,4574	7,8019
29	21,1247	33,7331	1,7	1,888285	0,846006	2,375555	40152	0,3167	7,3248
29	3	4,2055	0,1542	0,018944	0,008487	0,030135	29169	0,0446	0,6541
30	30	55,9162	1,7744	2,479481	1,110879	3,575977	25258	0,4464	7,7648
30	23,0521	36,5896	1,7	2,053598	0,920071	2,600987	36991	0,3516	7,3497
30	3	4,2663	0,1225	0,015989	0,007163	0,023978	22829	0,0435	0,5199
31	30	59,977	1,771	2,319368	1,039143	3,562855	23510	0,4462	7,7362
31	23,3437	39,2167	1,7	1,975255	0,884971	2,632381	34526	0,3542	7,3453
31	3	4,2995	0,1472	0,017208	0,00771	0,028811	27244	0,0438	0,6244
32	30	56,5223	1,757	2,422286	1,085254	3,526795	24742	0,4525	7,6577
32	25,4528	42,9223	1,7	2,151706	0,964026	2,877953	31537	0,3863	7,3654
32	3	4,1871	0,118	0,014837	0,006647	0,023093	22428	0,0456	0,5011
33	30	56,3598	1,7692	2,487772	1,114593	3,56476	24984	0,4498	7,7405
33	23,5064	38,0207	1,7	2,086831	0,93496	2,657109	35601	0,3538	7,3632
33	3	4,2932	0,1211	0,015935	0,007139	0,023752	22438	0,0445	0,5147
34	30	55,2613	1,7538	2,45385	1,099395	3,532747	25268	0,4476	7,6708
34	24,9646	41,4346	1,7	2,144636	0,960858	2,827164	32657	0,3822	7,377
34	3	4,1961	0,1185	0,014926	0,006687	0,023129	22462	0,0453	0,5018

*pokračování Příloha B*

35	30	58,1522	1,7434	2,316417	1,037821	3,508993	23866	0,4502	7,6192
35	24,9677	43,9285	1,7	2,059547	0,922736	2,826235	30803	0,3788	7,3737
35	3	4,2143	0,1494	0,018443	0,008263	0,029176	28193	0,0437	0,6326
36	30	55,7629	1,7621	2,462048	1,103068	3,547093	25164	0,4527	7,7018
36	24,1545	39,529	1,7	2,109788	0,945246	2,729994	34241	0,3666	7,3621
36	3	4,2215	0,1202	0,015489	0,00694	0,023539	22651	0,0443	0,5101
37	30	56,922	1,7504	2,38667	1,069297	3,519678	24481	0,4542	7,6424
37	25,1144	42,6041	1,7	2,123173	0,951242	2,83886	31757	0,3847	7,3634
37	3	4,2214	0,1183	0,015414	0,006906	0,023195	22285	0,0446	0,5025
38	30	58,945	1,7904	2,407228	1,078507	3,611981	24187	0,4533	7,8428
38	20,9546	33,0204	1,7	1,891689	0,847531	2,357792	40989	0,3181	7,3293
38	3	4,2509	0,1519	0,018514	0,008295	0,029685	28430	0,0457	0,6439
39	30	58,3453	1,7174	2,197603	0,984589	3,449448	23431	0,4588	7,4899
39	28,1174	52,9603	1,7	2,111462	0,945995	3,191934	25557	0,4293	7,3947
39	3	4,2657	0,147	0,017642	0,007904	0,02874	27420	0,045	0,6235
40	30	58,7342	1,7493	2,295089	1,028266	3,520851	23715	0,4549	7,6448
40	24,7181	43,5455	1,7	2,021395	0,905643	2,797802	31068	0,3793	7,3733
40	3	4,2166	0,1517	0,018521	0,008298	0,029705	28625	0,0457	0,6444
41	30	58,7361	1,7951	2,414956	1,081969	3,619856	24353	0,4529	7,8595
41	21,5127	33,6382	1,7	1,926337	0,863054	2,420702	40228	0,3291	7,3299
41	3	4,2243	0,1413	0,016625	0,007448	0,027542	26618	0,0455	0,5977
42	30	58,1185	1,7604	2,368072	1,060964	3,547972	24108	0,4585	7,704
42	23,165	39,0546	1,7	1,994323	0,893514	2,617606	34643	0,3517	7,3609
42	3	4,223	0,1529	0,019118	0,008565	0,02978	28820	0,0444	0,6465
43	30	54,9161	1,7562	2,475432	1,109064	3,527003	25451	0,4494	7,6585
43	25,3694	41,9479	1,7	2,181084	0,977188	2,870596	32266	0,382	7,3707
43	3	4,2244	0,1165	0,014519	0,006505	0,022834	21924	0,0446	0,4948
44	30	57,3428	1,7916	2,489351	1,115301	3,614144	24866	0,4588	7,8477
44	21,2921	32,682	1,7	1,952643	0,87484	2,39853	41404	0,3237	7,3379
44	3	4,2594	0,1464	0,018102	0,00811	0,028599	27334	0,0454	0,6204
45	30	60,3845	1,7839	2,344757	1,050518	3,591338	23516	0,4488	7,798
45	22,5826	37,481	1,7	1,941137	0,869685	2,54504	36129	0,3367	7,3409
45	3	4,2679	0,1456	0,016801	0,007528	0,02848	27141	0,0424	0,6178
46	30	54,1818	1,7657	2,544587	1,140048	3,554983	25940	0,4537	7,7191
46	24,1222	38,1798	1,7	2,165458	0,970187	2,724754	35456	0,3647	7,3576
46	3	4,1811	0,1159	0,014912	0,006681	0,022702	22042	0,045	0,4921
47	30	55,9473	1,7956	2,547989	1,141572	3,623234	25549	0,4578	7,8673
47	21,0144	32,0554	1,7	1,952697	0,874864	2,364892	42204	0,3217	7,3308
47	3	4,227	0,147	0,018451	0,008267	0,02872	27679	0,0458	0,6231
48	30	55,4699	1,7703	2,490099	1,115636	3,566243	25400	0,4595	7,7437
48	23,5453	37,9829	1,7	2,089327	0,936079	2,659601	35616	0,3614	7,3583
48	3	4,3081	0,1252	0,016367	0,007333	0,024503	23116	0,0448	0,5313
49	30	58,8299	1,7751	2,326309	1,042253	3,572735	24014	0,4536	7,7578
49	23,1778	38,3694	1,7	1,96843	0,881913	2,612681	35258	0,3557	7,3431
49	3	4,2695	0,1465	0,017098	0,007661	0,028562	27292	0,0449	0,6197
50	30	56,089	1,77	2,468792	1,10609	3,552676	25130	0,4531	7,7141
50	23,9909	38,885	1,7	2,104948	0,943077	2,707226	34801	0,366	7,3506
50	3	4,2052	0,1183	0,015309	0,006859	0,023209	22378	0,0438	0,5027

*Príloha C - Inspekční certifikát magnetických vlastností jader u křivky č.2*

			INSPECTION OF MAGNETIC TESTING - 800°C/2hod						
ArcelorMittal Technotron s.r.o.					Inspection no. _type				
738 01 Frýdek-Místek					Order no.:				
					Contract no.:				
					Customer order no.:				
Core type	130-85-40				Internal no.:				
Grade:	M105-30P/SU				Measured by:		16.4.2019		
Quantity:	50								
Customer									
			Measured values of frekvency 50 Hz						
No.	H ef [A/m]	H max [A/m]	B max [T]	Core loss [W]	Spec. loss [W/kg]	App. power [VA]	Perm.	I rms [A]	U rms [V]
1	37,7248	77,729	1,7	2,687386	1,204026	4,522152	17400	0,5757	7,8075
1	30	55,6549	1,7193	2,426059	1,086944	3,484722	24605	0,4458	7,5674
1	3	4,2764	0,1304	0,016578	0,007427	0,025528	24267	0,0443	0,5542
2	30	56,7622	1,771	2,485715	1,113672	3,578624	24872	0,4515	7,7694
2	23,1571	36,9089	1,7	2,058934	0,922461	2,616491	36658	0,3507	7,3601
2	3	4,2217	0,1489	0,018561	0,008316	0,029085	28052	0,045	0,6307
3	30	54,906	1,7624	2,507105	1,123255	3,544625	25555	0,453	7,6966
3	24,481	39,1379	1,7	2,15156	0,963961	2,768506	34571	0,3743	7,3667
3	3	4,2186	0,1312	0,016541	0,007411	0,025652	24744	0,0446	0,5567
4	30	58,9944	1,7969	2,446965	1,096311	3,638348	24241	0,4577	7,9004
4	20,9708	32,9814	1,7	1,902337	0,852301	2,370635	41032	0,3186	7,3636
4	3	4,2493	0,1512	0,018389	0,008239	0,029547	28304	0,045	0,6404
5	30	55,1307	1,755	2,459659	1,101998	3,53366	25340	0,4534	7,6728
5	24,9454	40,9811	1,7	2,152585	0,96442	2,822683	33011	0,3828	7,3712
5	3	4,2345	0,1215	0,015008	0,006724	0,02382	22794	0,0434	0,5152
6	30	54,9563	1,7608	2,524533	1,131063	3,554962	25507	0,4407	7,7191
6	24,6739	40,7852	1,7	2,180896	0,977104	2,800467	33242	0,3601	7,3918
6	3	4,2407	0,1203	0,014951	0,006698	0,023589	22571	0,0414	0,5121
7	30	57,7272	1,7567	2,461405	1,10278	3,549488	24234	0,4527	7,7071
7	24,9604	41,3523	1,7	2,14863	0,962648	2,832218	32715	0,377	7,3916
7	3	4,2657	0,1204	0,015198	0,006809	0,023587	22462	0,0428	0,5117
8	30	55,4939	1,7839	2,520972	1,129468	3,600465	25593	0,4515	7,8178
8	22,159	34,6405	1,7	2,010072	0,90057	2,500279	39061	0,3393	7,3501
8	3	4,2396	0,1454	0,017985	0,008058	0,028484	27291	0,0436	0,6176
9	30	59,5291	1,7717	2,351083	1,053353	3,587538	23685	0,4598	7,79
9	22,2155	36,725	1,7	1,933581	0,8663	2,512342	36868	0,3336	7,3663
9	3	4,2512	0,1581	0,019423	0,008702	0,030872	29587	0,043	0,67
10	30	58,2956	1,7879	2,577577	1,154829	3,620131	24412	0,4462	7,8607
10	21,8897	34,0936	1,7	2,024853	0,907192	2,476376	39680	0,3347	7,3695
10	3	4,2336	0,1472	0,018509	0,008292	0,028772	27669	0,0425	0,6247
11	30	53,9497	1,7578	2,537955	1,137077	3,548797	25932	0,4474	7,7057
11	24,841	39,3665	1,7	2,220789	0,994977	2,823625	34377	0,3689	7,4042
11	3	4,2002	0,1208	0,01543	0,006913	0,023625	22891	0,0453	0,5128
12	30	54,6462	1,7607	2,487978	1,114686	3,55611	25644	0,4567	7,7217
12	24,742	41,0163	1,7	2,149886	0,963211	2,808866	33010	0,3694	7,3947
12	3	4,2163	0,1253	0,016067	0,007198	0,024556	23650	0,0458	0,5331
13	30	58,158	1,7613	2,483495	1,112677	3,560942	24142	0,4499	7,7319
13	24,5098	40,023	1,7	2,137942	0,957859	2,783964	33801	0,3663	7,3992
13	3	4,2455	0,1331	0,016757	0,007508	0,026015	24950	0,0442	0,5648
14	30	55,0128	1,7632	2,484029	1,112916	3,560714	25523	0,4534	7,7313
14	24,4211	40,023	1,7	2,132356	0,955357	2,768809	33817	0,3713	7,3854
14	3	4,2897	0,125	0,016004	0,00717	0,02452	23191	0,0445	0,5324
15	30	62,9283	1,7773	2,355742	1,05544	3,598349	22478	0,4599	7,8135
15	22,4831	37,5978	1,7	1,96141	0,878768	2,542736	36018	0,3368	7,367
15	3	4,2211	0,1467	0,017541	0,007859	0,028595	27657	0,0458	0,6208
16	30	56,6939	1,7236	2,216126	0,992888	3,462311	24201	0,4576	7,5181
16	27,9073	50,912	1,7	2,114261	0,94725	3,165069	26583	0,4246	7,3878
16	3	4,2672	0,1367	0,015749	0,007056	0,026728	25480	0,0451	0,5799

*pokračování Příloha C*

17	30	58,1413	1,7922	2,435065	1,090979	3,623628	24532	0,4598	7,8683
17	20,6769	31,8865	1,7	1,885425	0,844724	2,329883	42437	0,3167	7,3402
17	3	4,2183	0,1516	0,018427	0,008256	0,029605	28604	0,0451	0,6427
18	30	58,5404	1,7699	2,328997	1,043457	3,576785	24065	0,4562	7,7666
18	22,6979	37,5486	1,7	1,94586	0,871801	2,559725	36040	0,342	7,3461
18	3	4,2519	0,1463	0,016819	0,007536	0,028586	27378	0,0428	0,6205
19	30	57,9839	1,7924	2,429106	1,088309	3,62607	24611	0,4518	7,8734
19	20,7889	32,5693	1,7	1,887552	0,845678	2,345262	41538	0,3176	7,3488
19	3	4,2366	0,1553	0,019188	0,008597	0,030379	29161	0,0452	0,6587
20	30	59,2096	1,7699	2,325816	1,042032	3,563784	23791	0,4549	7,7384
20	23,2349	38,9367	1,7	1,977172	0,88583	2,620285	34780	0,3518	7,3455
20	3	4,2569	0,1428	0,016727	0,007494	0,028034	26663	0,0439	0,606
21	30	54,3951	1,7589	2,487467	1,114456	3,529545	25742	0,4527	7,664
21	25,4631	41,3219	1,7	2,196534	0,98411	2,876076	32739	0,389	7,3578
21	3	4,2141	0,1183	0,014823	0,006641	0,023193	22322	0,0447	0,5028
22	30	57,9256	1,7824	2,393663	1,07243	3,597096	24490	0,4596	7,8107
22	21,116	33,1973	1,7	1,895107	0,849062	2,374007	40759	0,3176	7,3235
22	3	4,2215	0,1553	0,019148	0,008579	0,030414	29243	0,0429	0,6584
23	30	59,3317	1,7798	2,351057	1,053341	3,588724	23873	0,4581	7,7925
23	22,5918	36,9463	1,7	1,955341	0,876049	2,548746	36619	0,3384	7,3491
23	3	4,2639	0,1425	0,016913	0,007578	0,027814	26600	0,0455	0,6037
24	30	58,7012	1,7621	2,304867	1,032647	3,547304	23908	0,4544	7,7021
24	23,9361	40,4496	1,7	1,995844	0,894195	2,699069	33447	0,3648	7,3454
24	3	4,2265	0,1469	0,01711	0,007666	0,028719	27657	0,0449	0,6234
25	30	59,9005	1,7827	2,317104	1,038129	3,588436	23685	0,4602	7,792
25	22,5109	36,7231	1,7	1,927639	0,863638	2,53433	36870	0,3428	7,3333
25	3	4,2633	0,1455	0,016699	0,007482	0,028431	27158	0,046	0,6173
26	30	59,6217	1,7582	2,265579	1,015044	3,536502	23469	0,4591	7,6791
26	24,7966	43,0282	1,7	2,007071	0,899225	2,802315	31441	0,3728	7,3619
26	3	4,239	0,149	0,017288	0,007746	0,029079	27957	0,0447	0,6304
27	30	54,0271	1,7459	2,429973	1,088698	3,497648	25724	0,4589	7,5947
27	25,8713	42,9213	1,7	2,186736	0,97972	2,917073	31530	0,3916	7,3447
27	3	4,2575	0,1209	0,015163	0,006793	0,02359	22592	0,0452	0,5115
28	30	59,3725	1,7894	2,43337	1,090219	3,618872	24039	0,456	7,8581
28	20,8247	32,3644	1,7	1,892514	0,847901	2,345951	41824	0,3151	7,338
28	3	4,2223	0,1504	0,018343	0,008218	0,029388	28350	0,0409	0,6378
29	30	55,9424	1,7786	2,483389	1,112629	3,585037	25303	0,4596	7,7845
29	22,717	35,8633	1,7	2,031186	0,910029	2,565123	37723	0,3354	7,3556
29	3	4,2146	0,1396	0,017059	0,007643	0,02729	26349	0,0453	0,5923
30	30	55,2834	1,7465	2,433193	1,09014	3,511751	25163	0,4532	7,6249
30	25,4347	42,5485	1,7	2,175857	0,974847	2,877778	31812	0,3829	7,37
30	3	4,2182	0,1132	0,014243	0,006381	0,022277	21343	0,042	0,483
31	30	59,6167	1,7478	2,281523	1,022188	3,520635	23333	0,4597	7,6447
31	24,6342	43,6353	1,7	2,017324	0,903819	2,788455	31067	0,3689	7,3727
31	3	4,246	0,1542	0,019115	0,008564	0,030161	28888	0,0442	0,654
32	30	54,3921	1,7617	2,521548	1,129726	3,535903	25777	0,4522	7,6776
32	24,629	39,1046	1,7	2,173721	0,973889	2,779115	34597	0,3726	7,3505
32	3	4,2053	0,1201	0,014966	0,006705	0,023403	22721	0,0453	0,5079
33	30	56,1332	1,7632	2,434291	1,090632	3,543999	25016	0,4441	7,695
33	23,9683	39,027	1,7	2,085825	0,93451	2,704963	34669	0,3609	7,3516
33	3	4,3168	0,1192	0,015528	0,006957	0,023319	21974	0,0458	0,5061
34	30	54,4954	1,7773	2,54998	1,142464	3,564437	25964	0,4487	7,7395
34	23,9859	37,7769	1,7	2,142716	0,959998	2,704446	35813	0,3646	7,3449
34	3	4,2435	0,1194	0,015228	0,006823	0,023368	22371	0,043	0,5064
35	30	58,8208	1,786	2,394385	1,072753	3,604442	24164	0,4556	7,8267
35	21,1433	33,5677	1,7	1,895306	0,849151	2,382256	40309	0,3176	7,3395
35	3	4,2348	0,1529	0,018681	0,00837	0,029874	28733	0,0444	0,6478
36	30	60,0305	1,7852	2,339798	1,048297	3,599895	23680	0,4513	7,8165
36	22,0716	35,4778	1,7	1,919822	0,860135	2,4855	38137	0,3311	7,3356
36	3	4,2581	0,1471	0,017039	0,007634	0,028736	27483	0,0449	0,6238



*pokračování Příloha C*

37	30	54,9894	1,7561	2,48811	1,114745	3,534786	25432	0,4554	7,6752
37	24,9904	40,9245	1,7	2,177211	0,975453	2,827682	33061	0,3785	7,3708
37	3	4,1872	0,119	0,015129	0,006778	0,023404	22611	0,0451	0,5074
38	30	59,3692	1,7484	2,276965	1,020146	3,521906	23460	0,4482	7,6468
38	24,945	43,9453	1,7	2,030383	0,90967	2,822623	30791	0,3819	7,3709
38	3	4,2321	0,149	0,018276	0,008188	0,029227	28000	0,0436	0,6324
39	30	60,2418	1,7718	2,332976	1,04524	3,576864	23411	0,457	7,7666
39	22,4022	37,1728	1,7	1,940065	0,869205	2,528886	36406	0,3418	7,3534
39	3	4,2418	0,1511	0,018369	0,00823	0,029513	28345	0,0458	0,6407
40	30	59,6272	1,7782	2,328872	1,043401	3,581766	23738	0,4463	7,7773
40	22,66	37,348	1,7	1,943741	0,870852	2,552511	36243	0,3427	7,3376
40	3	4,2365	0,1455	0,016811	0,007532	0,028491	27320	0,0443	0,6166
41	30	57,69	1,809	2,516421	1,127429	3,655811	24973	0,4539	7,9377
41	19,7026	28,7812	1,7	1,861889	0,83418	2,21282	47012	0,299	7,3159
41	3	4,2458	0,1487	0,018175	0,008143	0,029085	27866	0,0455	0,631
42	30	59,7445	1,7915	2,343369	1,049897	3,607571	23873	0,4475	7,8332
42	21,9256	35,212	1,7	1,912025	0,856642	2,467702	38440	0,3259	7,3313
42	3	4,2446	0,1468	0,017157	0,007687	0,028741	27521	0,044	0,6231
43	30	60,3067	1,7972	2,406867	1,078345	3,627837	23716	0,4582	7,8774
43	20,648	32,0715	1,7	1,874894	0,840006	2,324238	42204	0,3131	7,3325
43	3	4,2419	0,1509	0,018148	0,008131	0,029533	28300	0,0447	0,6403
44	30	55,8643	1,7498	2,422636	1,08541	3,526101	24928	0,4569	7,6565
44	25,3511	42,3905	1,7	2,148612	0,96264	2,871209	31932	0,3815	7,3773
44	3	4,2297	0,1214	0,015009	0,006725	0,023705	22833	0,0446	0,5146
45	30	58,192	1,7762	2,381418	1,066944	3,580401	24306	0,4512	7,7743
45	22,9252	37,7588	1,7	1,980934	0,887515	2,588493	35839	0,3474	7,355
45	3	4,2497	0,141	0,016694	0,007479	0,027622	26394	0,0442	0,5987
46	30	54,4541	1,7559	2,46948	1,106398	3,531407	25685	0,4528	7,6675
46	24,9327	40,8951	1,7	2,149183	0,962895	2,819043	33085	0,3811	7,3653
46	3	4,2457	0,1276	0,016159	0,00724	0,025072	23903	0,0431	0,5438
47	30	56,5697	1,7626	2,44442	1,09517	3,547601	24798	0,4517	7,7029
47	24,3488	40,0034	1,7	2,108822	0,944813	2,752167	33840	0,3682	7,3625
47	3	4,2599	0,1186	0,015684	0,007027	0,023253	22157	0,046	0,5048
48	30	56,5985	1,7545	2,419163	1,083855	3,533018	24679	0,4569	7,6714
48	24,609	40,8113	1,7	2,123087	0,951204	2,783043	33161	0,3735	7,3667
48	3	4,2195	0,1168	0,014638	0,006558	0,022806	22014	0,0445	0,4946
49	30	54,26	1,7766	2,551726	1,143246	3,576282	26068	0,4516	7,7654
49	23,6115	36,8311	1,7	2,12101	0,950273	2,668029	36738	0,3555	7,3608
49	3	4,2204	0,1358	0,017615	0,007892	0,02664	25576	0,0435	0,5764
50	30	54,6016	1,7572	2,50195	1,120945	3,541138	25613	0,4578	7,6892
50	24,7586	39,7586	1,7	2,178408	0,975989	2,804278	34032	0,372	7,3783
50	3	4,2361	0,1151	0,014419	0,00646	0,022544	21597	0,044	0,4878